

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA DO PARICÁ

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito exigido pelo Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil

MANUEL JESÚS MANRÍQUEZ FIGUEROA

Florianópolis, fevereiro 2008.

# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA DO PARICÁ

MANUEL JESÚS MANRÍQUEZ FIGUEROA

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

---

Prof. Dr. Glicério Trichês – Coordenador do PPGEC

---

Prof. Dr. Poliana Dias de Moraes. Orientador ECV – UFSC

## COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs. ECV – UFSC

---

Prof. Dr. Ângela do Valle. ECV – UFSC

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. ECV – UFSC

---

Prof. Dr. Alexandre Landesmann. UFRJ – COPPE

*Às minhas esposa Mila e filhas Francisca e Ignacia,  
pelo amor, incentivo e compreensão  
em todos os momentos.*

*O Senhor é o meu pastor e nada me faltará;  
Ele me faz descansar em campinas verdejantes  
e me leva a águas tranquilas*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pois sem eles não seria o que sou hoje;

À Prof. Poliana Dias de Moraes, pois além de uma excelente orientadora, pela amizade, paciência e disponibilidade em todas as etapas do trabalho;

Aos professores Carlos Alberto Szücs e Ângela do Valle, pela amizade, ajuda e agradável convivência no GIEM;

Ao Eng. Rodrigo Figueiredo Terezo, doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, pela doação da madeira utilizada neste trabalho e pela colaboração constante, amizade e convivência durante este período;

Ao meu amigo, Willian Pescador, aluno do Curso de Engenharia Civil, pela amizade, ajuda e colaboração na realização deste trabalho;

Aos companheiros de pós-graduação Gustavo, Camila, Joana, Luciana e Rute, pela amizade e contato agradável, pela ajuda mútua no desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa;

Aos bolsistas Luciane, Carolina, Frederico, Cristina, Gilharde, Celso, Saulo, Hugo, e à aluna do Curso de Engenharia Civil, Daniela Matschulat Ely, pela ajuda e valioso e indispensável auxílio na execução da etapa experimental em laboratório;

Ao Departamento de Engenharia em Construção: Raúl Gallardo pela amizade, aos professores Yasna Segura, Homero Villegas e José Carcamo;

Ao Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira – GIEM e ao Laboratório de Experimentação em Estruturas – LEE, por fornecerem a infra-estrutura para o desenvolvimento dos trabalhos;

À Universidade de Magallanes pelo suporte financeiro;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo financiamento dos equipamentos para esta pesquisa.

## RESUMO

A arquitetura atual tende a empregar estruturas cada vez mais leves tanto por razões estéticas como por razões econômicas. Verifica-se que as estruturas em madeira se adaptam a estes desafios, proporcionando edificações agradáveis e de alta qualidade ambiental. Porém, para generalizar a utilização da madeira proveniente de florestas plantadas, depara-se com questões relativas à segurança contra incêndio. No sentido de resolver essas questões, a legislação atual determina um tempo mínimo de estabilidade de estruturas em situação de incêndio a fim de permitir a evacuação das edificações e o combate ao fogo.

O potencial de desempenho ao fogo já é reconhecido para madeiras oriundas de florestas nativas, mas não existem muitos dados da influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas deste material, o que também ocorre para madeiras oriundas de florestas plantadas.

Este trabalho visa determinar a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas do paricá (*Schizolobium amazonicum*) oriundo de florestas plantadas da região amazônica. Para tal, foram estudadas as resistências à compressão, tração e cisalhamento paralelos às fibras e as resistências ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras em 15 faixas de temperatura situadas entre 20 e 230 °C. Os ensaios foram realizados com amostras com teor de umidade médio de 11,74 % e massas específicas aparentes entre 282,94 kg/m<sup>3</sup> e 464,53 kg/m<sup>3</sup>.

Verificou-se que a resistência mecânica do paricá diminui em função do aumento da temperatura. À 230 °C, esta redução chega à 35,07 % para a resistência à compressão, 19,86 % para a resistência à tração, 35,31 % para a resistência ao cisalhamento, 60,69 % para a resistência ao embutimento paralelo às fibras e à 43,38 % para a resistência ao embutimento perpendicular às fibras. Além da redução da resistência, constataram-se alterações como a desidratação dos corpos-de-prova, degradação térmica de seus componentes químicos da madeira, retração e mudanças de cor.

**Palavras-chave:** madeira, temperatura e resistência mecânica.

## ABSTRACT

The trend in modern architecture requires lighter structures for aesthetical reasons and cost reduction. Timber structures lend themselves better to these new challenges. They are pleasing and have less environmental impact. However, the wider use of wood for building raises concern for fire safety. The current codes require the structure stability for a minimum time to ensure the building evacuation and the fire fight. Although the fire performance of rain forest woods is already known, there is a need of information about the influence of the temperature on mechanical properties of this material. The same occurs for planted forest.

The aim of this work is to determine the influence of temperature on mechanical properties of Paricá (*Schizolobium amazonicum*) from Amazon planted forest. The compression, tensile and shear strengths parallel-to-grain and embedding strength parallel and perpendicular to grain were determined at 15 temperature levels in the range from 20 to 230 °C. The testes were executed on samples formed by small clear wood specimens with density between 282,9 and 464,5 kg/m<sup>3</sup> and average moisture content of 11,7 %.

All mechanical data concerning strength tests of Paricá were statistically treated. Variance analysis was carried out in order to check statistically significant differences, with 95 % reability, between strength at a given temperature and those at the ambient temperature. It was verified that the mechanical strength of Paricá decreases in a non-monotonic way as the temperature increases. At 230 °C, the average reduction was 35 % for the compression, 20 % for the tensile, 35 % for the shear and 60 % for the embedding strengths for parallel to grain and 40 % for embedding strength perpendicular to grain. Besides the strength decrease, changes like specimens' dehydration, thermal degradation of chemical wood compounds, shrinkage and change of colour were detected.

**Keywords::** Wood, temperature, mechanical strength.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	17
2.2 CARACTERÍSTICAS DO PARICÁ.....	17
2.3 ESTRUTURA E ULTRAESTRUTURA DA MADEIRA.....	18
2.3.1 <i>Elementos constituintes da madeira.</i> .....	19
2.3.2 <i>Camada da parede celular.</i> .....	20
2.4 POLÍMEROS DA MADEIRA.....	21
2.4.1 <i>Celulose.</i> .....	22
2.4.2 <i>Hemicelulose.</i> .....	23
2.4.3 <i>Lignina.</i> .....	24
2.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE POLÍMEROS DA MADEIRA. ....	25
2.5.1 <i>Influência da temperatura sobre celulose.</i> .....	26
2.5.2 <i>Influência da temperatura sobre hemicelulose.</i> .....	28
2.5.3 <i>Influência da temperatura na lignina.</i> .....	28
2.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA. ....	31
2.6.1 <i>Resistência à compressão paralela às fibras.</i> .....	34
2.6.2 <i>Resistência à tração paralela às fibras.</i> .....	36
2.6.3 <i>Resistência à tração perpendicular às fibras.</i> .....	38
2.6.4 <i>Resistência ao cisalhamento.</i> .....	39
2.6.5 <i>Módulo de elasticidade à flexão (MOE).</i> .....	40
2.6.6 <i>Resistência ao embutimento da madeira.</i> .....	41
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>43</b>
3.1 AMOSTRAS E CORPOS-DE-PROVA.....	43
3.1.1 <i>Ensaio de compressão paralela às fibras.</i> .....	43
3.1.2 <i>Ensaio de tração paralela às fibras.</i> .....	45
3.1.3 <i>Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.</i> .....	46
3.1.4 <i>Ensaio de embutimento paralelo às fibras.</i> .....	48
3.1.5 <i>Ensaio de embutimento perpendicular às fibras.</i> .....	49
3.2 TESTES MECÂNICOS.....	51
3.2.1 <i>Ensaio de compressão paralela às fibras.</i> .....	51
3.2.2 <i>Ensaio de tração paralela às fibras.</i> .....	52
3.2.3 <i>Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.</i> .....	52
3.2.4 <i>Ensaio de embutimento paralelo e perpendicular às fibras.</i> .....	53
3.3 AQUECIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA. ....	55
3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA.....	58
3.4.1 <i>Ensaio de compressão paralela às fibras.</i> .....	58
3.4.2 <i>Ensaio tração paralela às fibras.</i> .....	58
3.4.3 <i>Ensaio cisalhamento paralelo às fibras.</i> .....	59
3.4.4 <i>Ensaio de embutimento paralelo e perpendicular às fibras.</i> .....	60
3.5 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.....	61
3.6 MASSA ESPECÍFICA APARENTE. ....	62



<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>63</b>
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	63
4.1.1	<i>Teor de umidade dos corpos-de-prova após o ensaio.</i> .....	63
4.1.2	<i>Alteração da coloração dos corpos-de-prova.</i> .....	64
4.1.3	<i>Comportamento do ensaio à compressão.</i> .....	65
4.1.4	<i>Resistência à compressão paralela às fibras.</i> .....	70
4.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS. ....	73
4.2.1	<i>Teor de umidade dos corpos-de-prova após do ensaio.</i> .....	73
4.2.2	<i>Alteração da coloração dos corpos-de-prova.</i> .....	74
4.2.3	<i>Comportamento do ensaio à tração.</i> .....	75
4.2.4	<i>Resistência à tração paralela às fibras.</i> .....	79
4.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO. ....	81
4.3.1	<i>Teor de umidade dos corpos-de-prova após de ensaio.</i> .....	81
4.3.2	<i>Alteração da coloração dos corpos-de-prova.</i> .....	82
4.3.3	<i>Ruptura dos corpos-de-prova.</i> .....	83
4.3.4	<i>Resistência ao cisalhamento.</i> .....	85
4.4	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS. ....	88
4.4.1	<i>Teor de umidade dos corpos-de-prova após ensaio.</i> .....	88
4.4.2	<i>Alteração da coloração dos corpos-de-prova.</i> .....	89
4.4.3	<i>Ruptura dos corpos-de-prova no ensaio ao embutimento.</i> .....	90
4.4.4	<i>Resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras.</i> .....	95
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Plantação de paricá na microrregião de Paragominas (COSTA et al, 1998).	13
Figura 2: Vigas de madeira e aço após um incêndio (Laboratório de Produtos Florestais Norte-americanos).	15
Figura 3: Resultados de testes realizados pela Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Florestais de Estados Unidos no instituto de investigação do Sudeste dos Estados Unidos, (Instituto de Construção com Madeira, 2006).	15
Figura 4: Aspectos macroscópicos da madeira em uma secção transversal do	18
Figura 5: Seção longitudinal de uma fibrila elementar (BODIG e JAYNE, 1982).	19
Figura 6: Estrutura da parede celular.	21
Figura 7: Molécula da celulose (D' ALMEIDA, 1988).	22
Figura 8: Componentes das hemiceluloses (D' ALMEIDA, 1988).	23
Figura 9: Precursores da lignina (FENGEL e WENEGER, 1989).	24
Figura 10: Resíduo de lignina e celulose da madeira em função do tempo de carbonização (BRITO e BARRICHELO, 2001).	30
Figura 11: Transição vítrea dos componentes da madeira.	31
Figura 12: Efeito da temperatura na resistência a tração perpendicular e compressão paralela às fibras (GERHARDS, 1982).	32
Figura 13: Transição vítrea da lignina e hemicelulose (IRVINE, 1984).	32
Figura 14: Efeito da temperatura e umidade na resistência à compressão paralela às fibras (SCHAFFER, 1973; KNUDSON e SCHNIEWIND, 1975; YOUNG e CLANCY, 2001).	35
Figura 15: Resistência à compressão paralela relativa da madeira (YOUNG e CLANCY, 2001).	36
Figura 16: Resistência à tração paralela às fibras (SCHAFFER 1973).	37
Figura 17: Influência da temperatura sobre a resistência à tração paralela às fibras (BUCHANAN, 1998).	38
Figura 18: Influência da temperatura na resistência à tração perpendicular às fibras (GERHARDS, 1982).	39
Figura 19: Influência da temperatura sobre a resistência ao cisalhamento da madeira (GERHARDS, 1982).	40
Figura 20: Influência da temperatura em módulo de elasticidade a flexão (GERHARDS, 1982).	41
Figura 21: Influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento paralelo às fibra (MORAES et al, 2005).	42
Figura 22: Influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento perpendicular às fibra (MORAES et al, 2005).	42
Figura 23: Corpos-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras.	44
Figura 24: Corpos-de-prova para ensaio de tração paralela às fibras.	46
Figura 25: Corpos-de-prova para ensaio de cisalhamento.	47
Figura 26: Corpos-de-prova para ensaio de embutimento paralelo às fibras.	49
Figura 27: Corpos-de-prova para ensaio de embutimento perpendicular às fibras.	50
Figura 28: Arranjo do ensaio à compressão paralela às fibras.	51
Figura 29: Arranjo de ensaio à tração paralela às fibras.	52
Figura 30: Arranjo de ensaio para cisalhamento.	53
Figura 31: Arranjo de ensaio para embutimento paralelo às fibras.	54
Figura 32: Arranjo de ensaio para embutimento perpendicular às fibras.	54

Figura 33: Parafuso utilizado em os ensaios de embutimento paralelo e perpendicular.	55
Figura 34: Forno de aquecimento dos corpos-de-prova.	56
Figura 35: Corpos-de-prova com termopar.	56
Figura 36: Câmara térmica para realização de ensaio.	57
Figura 37: Controle e manutenção da temperatura durante o ensaio.	57
Figura 38: Diagrama força x deslocamento.	59
Figura 39: Diagrama força de cisalhamento paralela às fibras x deslocamento.	60
Figura 40: Diagrama força x embutimento.	61
Figura 41: Teor de umidade dos corpos-de-prova após os ensaios.	64
Figura 42: Variação da coloração dos corpos-de-prova em função da temperatura.	65
Figura 43: Ruptura dos corpos-de-prova em função da temperatura.	65
Figura 44 : Ruptura dos corpos-de-prova.	66
Figura 45: Ruptura por força cortante (BODIG, 1982).	67
Figura 46: Gráficos tensão de compressão paralela às fibras x deformação específica.	68
Figura 47: Deformação na ruptura à compressão dos corpos-de-prova.	69
Figura 48: Resistência à compressão paralela às fibras.	70
Figura 49: Intervalo de confiança da resistência à compressão paralela às fibras.	72
Figura 50: Comparação da resistência à compressão paralela às fibras com valores encontrados na literatura (KNUDSON e SCHIEWIND, 1975; YOUNG e CLANCY, 2001).	73
Figura 51: Teor de umidade dos corpos-de-prova após do ensaio.	74
Figura 52: Variação da coloração dos corpos-de-prova em função da temperatura.	75
Figura 53: Gráficos tensão de tração paralela às fibras x deformações específicas.	76
Figura 54: Deformação de ruptura à tração paralela às fibras dos corpos-de-prova.	77
Figura 55: Ruptura dos corpos-de-prova.	78
Figura 56: Resistência à tração paralela às fibras.	79
Figura 57: Resistência à tração paralela às fibras relativos.	80
Figura 58: Resistência à tração paralela às fibras normalizada.	81
Figura 59: Teor de umidade dos corpos-de-prova após do ensaio.	82
Figura 60: Variação da coloração dos corpos-de-prova em função da temperatura.	83
Figura 61: Ruptura dos corpos-de-prova.	84
Figura 62: Resistência ao cisalhamento.	85
Figura 63: Resistência ao cisalhamento paralela às fibras.	86
Figura 64: Resistência ao cisalhamento normalizada.	87
Figura 65: Teor de umidade dos corpos-de-prova de embutimento paralelo às fibras.	88
Figura 66: Teor de umidade dos corpos-de-prova de embutimento perpendicular às fibras.	89
Figura 67: Coloração dos corpos-de-prova de embutimento paralelo às fibras.	89
Figura 68: Coloração dos corpos-de-prova de embutimento perpendicular às fibras.	90
Figura 69: Ruptura dos corpos-de-prova em ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras.	91
Figura 70: Ruptura dos corpos-de-prova por fendilhamento.	92
Figura 71: Gráficos força de embutimento paralela às fibras x embutimento.	93
Figura 72: Gráficos força de embutimento perpendicular às fibras x embutimento.	94
Figura 73: Resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras.	95
Figura 74: Resistência ao embutimento paralelo às fibras normalizadas.	96
Figura 75: Resistência ao embutimento perpendicular às fibras relativa.	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas da madeira do paricá.....	18
Tabela 2: Composição química média da madeira.....	22
Tabela 3: Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte. .....	26
Tabela 4: Degradação da celulose. ....	27
Tabela 5: Degradação térmica da hemicelulose. ....	28
Tabela 6: Temperatura de transição vítrea de ligninas obtidas por vários métodos de isolamento.....	29
Tabela 7: Degradação térmica da lignina. ....	30
Tabela 8: Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova. ....	44
Tabela 9: Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova. ....	45
Tabela 10: Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova. ....	47
Tabela 11: Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova. ....	48
Tabela 12: Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova. ....	50

## 1 Introdução

A indústria madeireira é importante para a economia regional gerando empregos e renda para a população. Porém, a grande preocupação continua sendo a forma desordenada de utilização dos recursos florestais que vem ocasionando, em algumas áreas, a inviabilidade econômica da extração de madeira de matas nativas.

A espécie *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke é conhecida na Região Amazônica como paricá, bandarra ou guapuruvu-da-amazônia. Ocorre naturalmente na Amazônia Brasileira, no Peru e na Colômbia, em mata primária e mata secundária de terra firme e várzea alta (CARVALHO, 1994). Atualmente é plantada na região amazônica e destaca-se por apresentar rápido crescimento, fuste reto, com ramificação a partir de sete metros e madeira com elevada cotação no mercado interno e externo. Sua cor, de acordo com Munsell Soil Color Charts (1975), é castanha muito pálida, possui grã irregular, textura grosseira, gosto e cheiro indistintos. Quanto à sua durabilidade natural, é considerada como suscetível ao ataque de fungos e microorganismos (**Figura 1**).



**Figura 1:** Plantação de paricá na microrregião de Paragominas (COSTA et al, 1998).

Atualmente o uso do paricá é quase exclusivo na produção de miolo de laminados e compensados, sendo também aplicado em embalagens e paletes, provavelmente devido à falta de informações relativas às suas propriedades mecânicas. Poucos trabalhos foram encontrados sobre este assunto. Melo et al. (1989) informam alguns valores para madeira verde e seca ao ar e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) destaca que o paricá possui secagem, aplainamento, furação, fixação e torneamento fáceis e colagem moderadamente fácil. Terezo e Szücs (2007) identificam a influência das idades de corte na resistência mecânica.

A utilização da madeira como material de construção está limitada devido ao preconceito relativo à sua durabilidade e desempenho ao fogo entre vários motivos. A madeira é matéria combustível, diferente do aço e do concreto. Como os demais materiais combustíveis sólidos, a madeira, em condições normais, não queima diretamente. Inicialmente se decompõe em gases que, expostos ao calor, se convertem em chamas. Esses gases, por sua vez, aquecem a porção de madeira ainda não atingida pelo calor e promovem a liberação de mais gases inflamáveis, alimentando a combustão e gerando em um processo em cadeia.

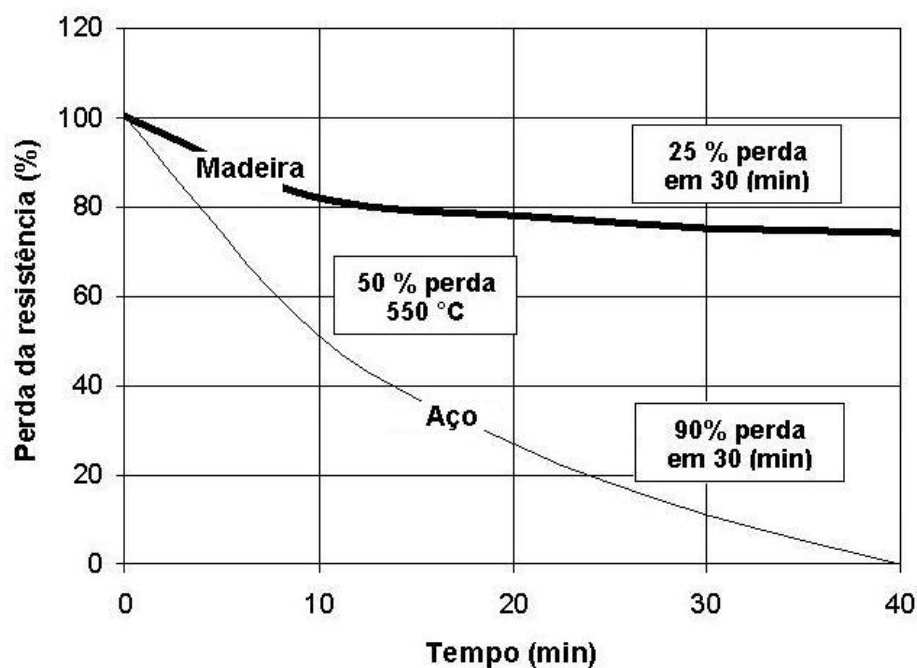
A madeira maciça de dimensões consideráveis não arde rapidamente e raramente o incêndio tem início em elementos deste material (ALVAREZ, 2000). Acima de aproximadamente 100 °C, mesmo que de forma acanhada, já começa a ocorrer a degradação térmica da madeira, como consequência da dilatação e da movimentação térmica das moléculas de seus constituintes. Sem chama piloto, apresenta uma temperatura de ignição relativamente elevada, acima de 400 °C. Com chama piloto atuando por um período de tempo significativo, a temperatura de ignição é em torno de 300 °C. Se ocorrer pré-aquecimento, esta temperatura seria de aproximadamente 150 °C (HARTL, 1995).

Ao expor a madeira ao fogo, ela conserva sua resistência mecânica durante mais tempo em comparação ao. A **Figura 2** mostra que um exemplo no qual a estrutura em aço se deforma completamente, enquanto que a viga de madeira permanece com capacidade de carga mesmo após submetida ao fogo em altas temperaturas.



**Figura 2:** Vigas de madeira e aço após um incêndio (Laboratório de Produtos Florestais Norte-americanos).

A **Figura 3** ilustra a variação da resistência do aço e da madeira em função do tempo de exposição ao fogo. Pode-se perceber que a 550 °C o aço perde 50 % de sua resistência nos primeiros 10 min, enquanto a madeira tem uma perda de 25 % em 30 min.



**Figura 3:** Resultados de testes realizados pela Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Florestais de Estados Unidos no instituto de investigação do Sudeste dos Estados Unidos, (Instituto de Construção com Madeira, 2006).

Num incêndio em completo desenvolvimento, após o “flashover”, os elementos estruturais e de compartimentação devem garantir a resistência ao fogo, estabilidade e capacidade portante.

Para conhecer a capacidade de sustentação das cargas de edificações com elementos estruturais de madeira, e dar uma maior segurança às pessoas que habitam as edificações é necessário desenvolver projetos estruturais seguros com relação a incêndios. Para se atingir este objetivo, é preciso conhecer o comportamento dos materiais utilizados nessa situação, determinando a influência da temperatura nas propriedades físicas e mecânicas da madeira.

Conhecendo o comportamento da madeira a temperaturas elevadas e fazendo usos deste, pode-se avaliar a segurança das estruturas afetadas por um incêndio e prever, com boa precisão em um projeto, o tempo de resistência dos elementos estruturais de uma edificação.

Este trabalho está inserido dentro das linhas de pesquisa do Grupo Interdisciplinar do Estudo da Madeira (GIEM), nas quais estão sendo desenvolvidos trabalhos sobre as potencialidades do paricá como material de construção (Terezo e Szücs, 2007). O objetivo geral deste trabalho é **“Determinar a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas do paricá”** (*Schizolobium amazonicum*).

Como **objetivos específicos** deste trabalho têm-se: determinar a influência da temperatura sobre as resistências à compressão paralela às fibras, à tração paralela às fibras, ao cisalhamento paralelo às fibras e ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras; obter curvas de correlação para estas propriedades mecânicas da madeira em função da temperatura, a fim de fornecer informações necessárias para se considerar a influência da temperatura no desenvolvimento de projetos de estrutura em situação de incêndio.



## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 INTRODUÇÃO.

A madeira é um material lenhoso, formado por células dispostas nos sentidos radial e axial, ligadas entre si pela lignina, que age como um cimento, conferindo sustentação ao tronco. Estas células passam por vários estágios de desenvolvimento, como a divisão celular, diferenciação e maturação, sendo influenciadas em cada um desses estágios por fatores genéticos, edáficos, climáticos, silviculturais, geográficos, dentre outros, apresentando variações dimensionais e químicas, resultando em material não uniforme, com alta variabilidade, entre e dentro das árvores (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989). Esta variabilidade é um grande inconveniente para utilização como matéria-prima para certos produtos, porém pode-se contornar este problema através de estudos específicos sobre às propriedades mecânicas e suas variações.

### 2.2 CARACTERÍSTICAS DO PARICÁ.

Segundo Carvalho (1994), o paricá apresenta bom desenvolvimento e rápido crescimento em altura e diâmetro, que são consideradas suas principais características. Quisen et al. (1999) descrevem que o paricá possui crescimento inicial vigoroso, chegando aos 15 anos com 55 cm de diâmetro à altura do peito (DPA).

Segundo Le Cointe (1947), o paricá produz uma madeira considerada leve ( $300 \text{ kg/m}^3$ ), de coloração branca, sendo indicada para a construção de forros, fabricação de palitos e canoas. De acordo com Pereira et al. (1982), o paricá fornece celulose de boa qualidade, pois o fácil branqueamento permite a fabricação de papel branqueado com excelente resistência.

Com relação às propriedades mecânicas do paricá, poucos trabalhos foram encontrados (MELO, 1989; TEREZO e SZÜCS, 2007). Melo (1989) apresenta algumas propriedades mecânicas para esta espécie e Terezo e Szücs (2007) mostram a influência das idades de corte sobre as propriedades mecânicas desta madeira (**Tabela 1**). Porém nada foi encontrado na literatura sobre a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas desta madeira.

**Tabela 1:** Propriedades mecânicas da madeira do paricá.

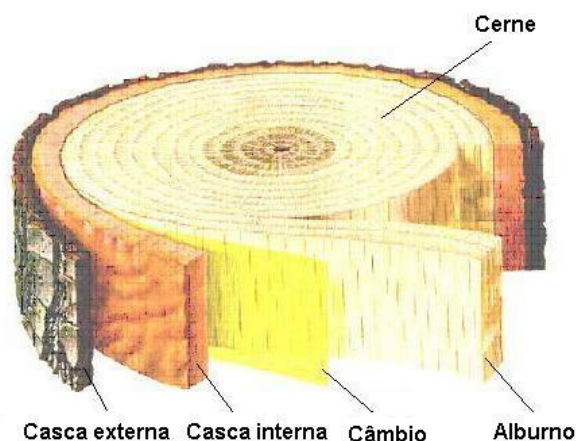
Propriedades mecânicas, Melo (1989)											
Condições	Flexão estática (MPa)		Compressão (MPa)		Tração (MPa)	Cisalhamento (MPa)	Dureza Janka (N)				
	Tensão de ruptura	Módulo de elasticidade	Paralela às fibras	Perpendicular às fibras	Perpendicular às fibras		Paralela	Transversal			
Verde	53,25	9120	23,14	4,31	3,33	7,26	3795,18	3246			
Seca	55,11	8040	34,03	4,51	2,65	10,89	4569,90	2687,02			
Propriedades mecânicas, Terezo e Szűcs (2007)											
Condições	Flexão estática (MPa)						Compressão paralela às fibras (MPa)				
	Tensão de ruptura			Módulo de elasticidades			Paralela às fibras			Módulo de elasticidades	
	Idades (anos)			Idades (anos)			Idades (anos)			Idades (anos)	
	6	10	Nativas	6	10	Nativas	6	10	Nativas	6	10
Seca 12 %	44,68	53,05	56,2	9322	9634	8200	23,80	24,38	34,70	11932	12403

**Fonte:** MELO (1989), apud COSTA et al. (1998), e TEREZO e SZÜCS\* (2007), Verde = madeira saturada e seca= madeira seca ao ar 12 %.

### 2.3 ESTRUTURA E ULTRAESTRUTURA DA MADEIRA.

A madeira é um material heterogêneo, sendo sua variabilidade estrutural e química refletida numa ampla gama de propriedades físicas, tais como: densidade, permeabilidade; capilaridade; condutividade térmica; difusão da água de impregnação, entre outras. O arranjo de seus componentes físicos (macroscópicos, microscópicos, ultramicroscópicos) e químicos definem a estrutura lenhosa como uma engenhosa organização arquitetônica da madeira. A **Figura 4** mostra os principais aspectos macroscópicos da madeira.

A madeira é um tecido complexo devido à sua formação por diferentes tipos de células, as quais desempenham diferentes funções.

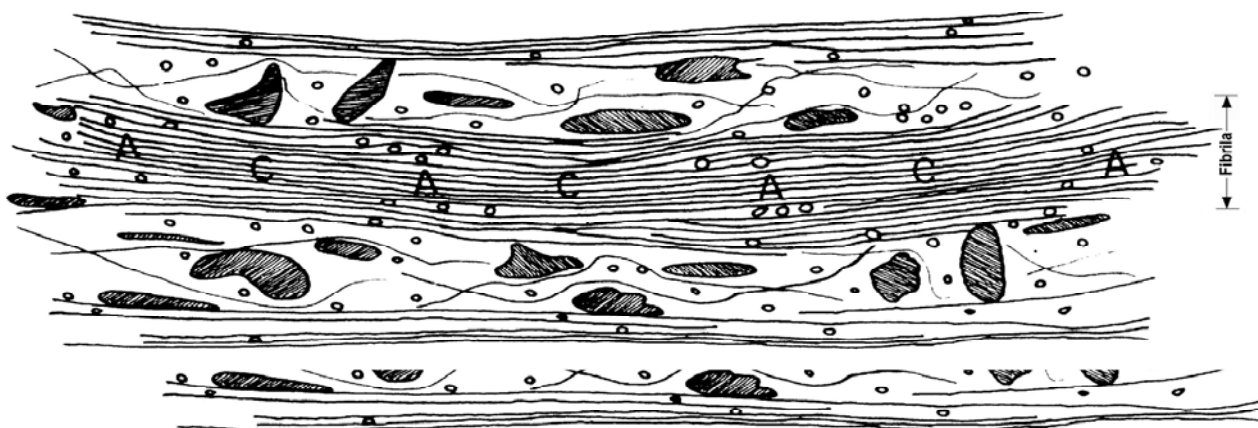


**Figura 4:** Aspectos macroscópicos da madeira em uma secção transversal do tronco de uma árvore (BARRICHELO E BRITTO, 1989).

### 2.3.1 Elementos constituintes da madeira.

As moléculas da celulose ocorrem raramente como entidades individuais dentro da parede celular. Algumas delas ficam em pacotes discretos chamados fibrilas elementares. Embora as dimensões destas fibrilas elementares sejam ainda um motivo de estudo, uma seção transversal elíptica ou retangular da ordem de  $3,5 \times 3,5$  nanômetro é considerada um valor aceitável. Cada fibrila elementar contém uma disposição paralela de 50 a 80 moléculas da celulose, tudo alinhado com o eixo central das fibrilas (BODIG e JAYNE, 1982). As fibrilas elementares estruturais são agregadas freqüentemente em unidades maiores por meio da ligação do hidrogênio entre suas superfícies respectivas.

A **Figura 5** ilustra uma seção longitudinal hipotética de uma fibrila elementar. Os elementos longos representam as moléculas da celulose. As porções cuidadosamente embaladas são as regiões cristalinas (C), unidas pelas regiões amorfas menos densas e menos ordenadas (A). As moléculas tridimensionais maiores representam a lignina, hemicelulose e extrativos. As moléculas menores representam água. Elas estão presentes em tudo na região cristalina. O ajuste destas moléculas na parede celular governa, na maior parte das vezes, as características físicas originais da madeira.



**Figura 5:** Seção longitudinal de uma fibrila elementar (BODIG e JAYNE, 1982).

### 2.3.2 Camada da parede celular.

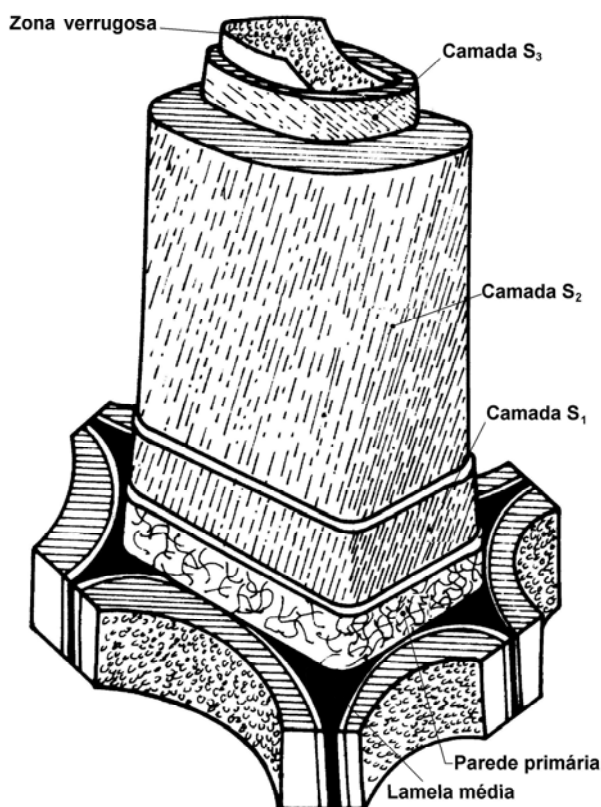
Sabe-se, através da microscopia eletrônica, que a parede celular é formada por camadas individuais dispostas segundo um arranjo concêntrico. A lamela média está localizada entre as células, servindo de elemento de ligação entre elas. É altamente lignificada, apresentando substância péctica, principalmente no estágio inicial de formação. Sua espessura é de 0,2 a 1,0  $\mu\text{m}$  (SARKANEN e LUDWIG, 1971).

A parede primária é delgada, com 0,1 a 0,2  $\mu\text{m}$  de espessura, contendo celulose, hemicelulose, pectina e proteína imersos numa matriz de lignina. Segundo Fengel e Wegener (1984), não há uma distinção clara entre essas camadas de forma que empregam a terminologia composto meia-lamela para designá-las. As microfibrilas de celulose formam um arranjo irregular em sua porção externa, enquanto que no interior são orientadas quase perpendicularmente ao eixo da célula (SARKANEN e LUDWIG, 1971).

A parede secundária é formada por três camadas,  $S_1$  e  $S_3$  (delgadas) e  $S_2$  (espessa). Na camada  $S_1$ , com 0,2 a 0,3  $\mu\text{m}$  de espessura, o arranjo das microfibrilas forma um ângulo entre 50 a 70° em relação ao eixo da célula considerada. A camada intermediária  $S_2$  forma a porção principal da célula, com espessura variando de 1 a 5  $\mu\text{m}$ . O ângulo microfibrilar varia entre 10 a 30° em relação ao eixo, diminuindo com o aumento do comprimento da fibra (SJÖSTRÖM, 1981).

A camada interna  $S_3$  da parede secundária tem 0,1  $\mu\text{m}$  de espessura. O ângulo das microfibrilas varia muito, oscilando entre 50 a 90° (SJÖSTRÖM, 1981).

Finalmente, a zona verrugosa é uma membrana amorfa delgada localizada na superfície interna da camada  $S_3$ , fazendo fronteira com o lúmen central oco. Essa zona é encontrada em quase todas as coníferas e em algumas folhosas, e possui depósitos verrugosos constituídos de material semelhante à lignina em conjunto com pequenas quantidades de hidratos de carbono e substâncias pécticas (SJÖSTRÖM, 1981; FENGEL e WEGENER, 1989) (**Figura 6**).



**Figura 6:** Estrutura da parede celular.

**Fonte:** IPT, Manual de preservação de madeiras (1986).

## 2.4 POLÍMEROS DA MADEIRA.

A madeira é um biopolímero tridimensional composto, primordialmente, de celulose, hemicelulose e lignina. Estes polímeros formam a parede celular da madeira e são responsáveis pela maioria das suas propriedades físico-químicas. Pode-se, assim, concluir que a madeira é um material extremamente complexo, poroso e com características diferentes nos seus três sentidos de crescimento.

A resistência da madeira está relacionada com suas propriedades químicas e físicas. A madeira é composta basicamente por celulose, lignina e hemicelulose. A celulose constitui aproximadamente 50 % deste material em peso. Durante o crescimento da madeira, as moléculas de celulose são ordenadas em microfibrilas, que, por sua vez, são organizadas em elementos estruturais maiores que compõem a parede celular das fibras de madeira. Em madeiras moles, a lignina compõe de 15 a 35 %. Embora a lignina esteja presente na parede celular, ela está concentrada no exterior e entre as células, formando a matriz interfacial, enquanto que a celulose e a

hemicelulose formam os traqueídeos tubulares paralelos às fibras em madeiras coníferas (**Tabela 2**).

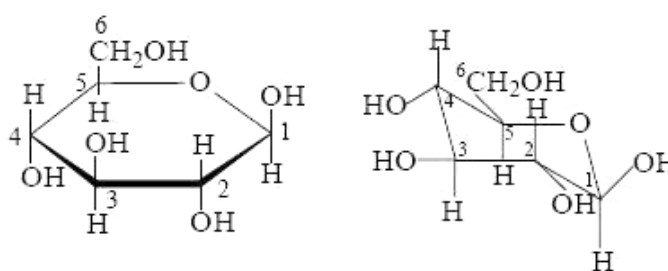
**Tabela 2:** Composição química média da madeira.

Componente	Presença
Celulose	≈ 50 %
Hemicelulose	≈20 %
Lignina	15 a 35 %
Constituintes menores	até ≈ 10 %

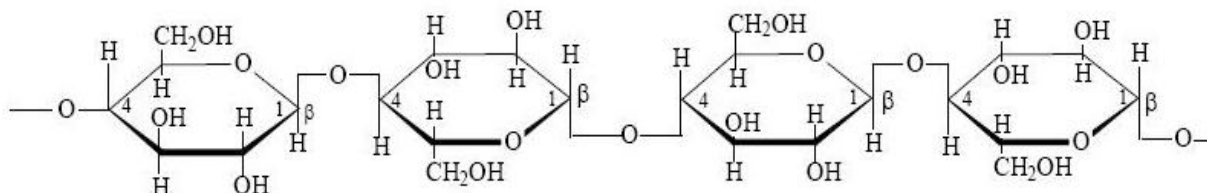
**Fonte:** D' Almeida (1988).

#### 2.4.1 Celulose.

Segundo D' Almeida (1988), a celulose é o principal componente da parede celular dos vegetais. Dependendo do tipo de planta, os teores de celulose podem estar na faixa entre 40 – 50 % (madeira) e até 99 % (algodão). Sua principal função nas plantas é formar a base da parede celular, agindo como suporte estrutural para a mesma. É um polissacarídeo linear, formado por unidades do monossacarídeo  $\beta$ -D-glucose (**Figura 7a**) unidas entre si por ligações glicosídeas através dos carbonos 1 e 4, (**Figura 7b**) apresenta a parte central da molécula de celulose.



(a) Representação da molécula de glicose.



(b) Parte central da molécula de celulose.

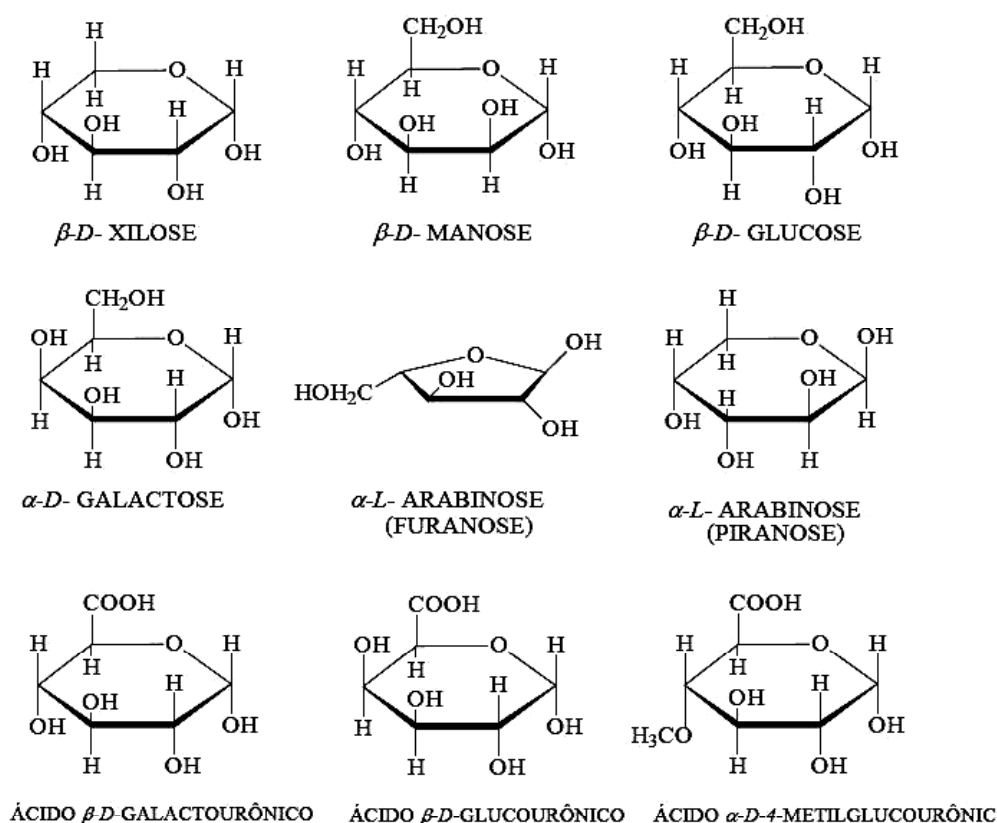
**Figura 7:** Molécula da celulose (D' ALMEIDA, 1988).

Segundo Sjöström (1981) e D' Almeida (1988), as moléculas de celulose tendem a formar ligações de hidrogênio intramoleculares (entre unidades de glucose da mesma

molécula) e intermoleculares (entre unidades de glucose de moléculas adjacentes). O primeiro tipo de interação é responsável por uma certa rigidez da célula unitária e o segundo pela formação da fibra vegetal, ou seja, as moléculas de celulose se alinham, formando as microfibrilas que possuem regiões ordenadas (cristalinas) alternadas com regiões menos ordenadas (amorfas), as quais formam as fibrilas, que por sua vez, se ordenam para formar as sucessivas paredes celulares da fibra de celulose.

#### 2.4.2 Hemicelulose.

Segundo Sjöström (1981), as hemiceluloses são constituídas por uma mistura de polissacarídeos poliméricos de baixa massa molar, os quais estão intimamente ligados à celulose nos tecidos das plantas. Enquanto a celulose, como substância química, contém somente a *D*-glucose como unidade fundamental, nas hemiceluloses podem aparecer em proporções variadas, as seguintes unidades de açúcar:  $\beta$ -*D*-xilose,  $\beta$ -*D*-manose,  $\beta$ -*D*-glucose,  $\alpha$ -*L*-arabinose,  $\alpha$ -*D*-galactose, ácido  $\beta$ -*D*-glucourônico, ácido  $\beta$ -*D*-galactourônico e ácido  $\alpha$ -*D*-4-metilglucourônico (**Figura 8**),

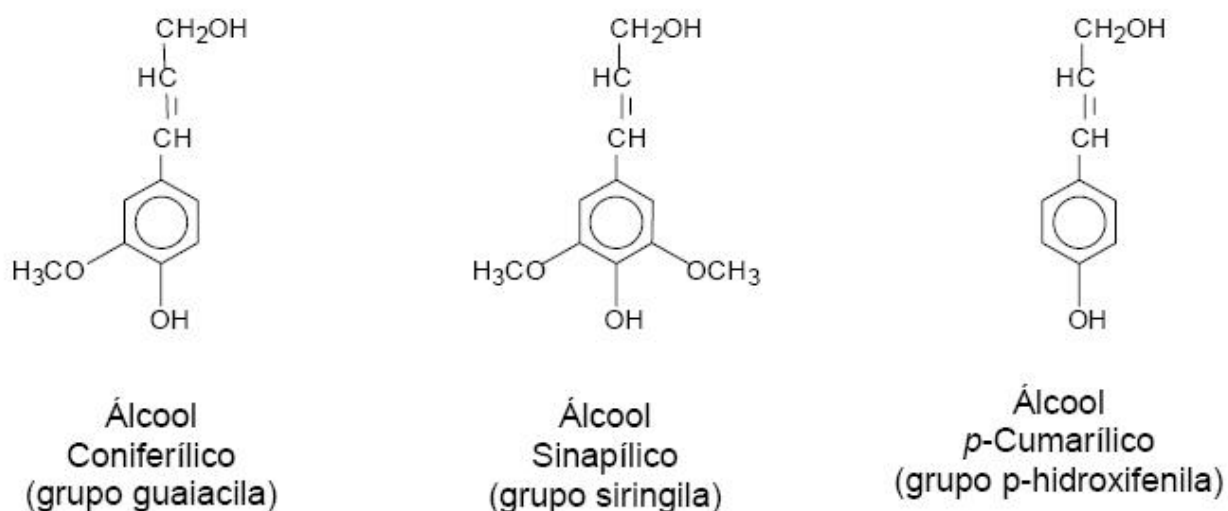


**Figura 8:** Componentes das hemiceluloses (D' ALMEIDA, 1988).

### 2.4.3 Lignina.

Segundo Fengel e Weneger (1989), a lignina é a substância orgânica natural mais abundante na madeira e a maior fonte de compostos aromáticos. Sua composição química, baseada em unidades fenilpropânicas, e sua estrutura macromolecular diferem significativamente da apresentada pelos outros dois componentes macromoleculares (celulose e hemicelulose).

Segundo D' Almeida (1988), a lignina é um composto amorfo e ramificado, existente nos vegetais lenhosos, cuja função é dar rigidez à parede celular, agindo como um agente de endurecimento e uma barreira à degradação enzimática da parede celular. É um polímero natural, cuja estrutura principal provém da polimerização dehidrogenativa (iniciada por enzimas) dos seguintes precursores primários: álcool coniferílico, álcool sinapílico e álcool p-cumarílico (**Figura 9**). De acordo com Fengel e Weneger (1989), essa reação é iniciada por transferência de elétrons, que resulta na formação de radicais fenóxidos, estabilizados por ressonância. Esses radicais se unem de diferentes maneiras de modo que a molécula resultante é muito complexa. Nessas moléculas mais de dois terços das unidades de fenilpropano estão unidas por ligações etéreas (C-O-C), e o restante por ligações C-C.



**Figura 9:** Precursores da lignina (FENGEL e WENEGER, 1989).



## 2.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE POLÍMEROS DA MADEIRA.

É fato conhecido que a madeira sob ação do calor sofre variações em suas dimensões, seja linear, superficial e volumétrica. Em temperaturas mais elevadas, sofre um processo de degradação no qual todos os seus componentes são profundamente modificados (GOMES e OLIVEIRA, 1982).

A madeira, quando é submetida a altas temperaturas, sofre uma decomposição térmica dos seus componentes: hemiceluloses, celulose e lignina, passando por um processo de carbonização sob atmosfera inerte. Os polímeros da madeira volatilizam-se intensamente em distintas faixas de temperatura: as hemiceluloses entre 200 e 300 °C, a celulose entre 240 e 350 °C e a lignina entre 350 e 500 °C (BRADBURY et al., 1979; CONESA et al., 1995; RESENDE, 1995; SALAZAR e CONNOR, 1983).

As fases da pirólise da madeira podem ser identificadas pela sua perda de massa, que ocorre por influência das reações químicas verificadas na elevação da temperatura. Guedira (1988), Vovelle e Mellottee (1982) classificam a redução de massa da madeira, durante o processo de pirólise, em cinco diferentes fases. A primeira fase situa-se entre a temperatura ambiente e 100 °C, e corresponde à saída da chamada água-livre e água higroscópica da madeira, que permanecia retida no lúmen e parede das células. A segunda fase ocorre entre 100 e 250 °C e também está ligada à eliminação de água. Uma parte dessa água ainda é chamada higroscópica, retida pelas paredes celulares e considerada como adsorvida junto às hidroxilas das cadeias de polissacarídeos e da lignina. Outra parte da água é chamada água de constituição, cuja eliminação é acompanhada por uma degradação irreversível da madeira, sobretudo de seus grupos hidroxílicos. A terceira fase situa-se entre 250 e 330 °C, na qual ocorre, em geral, a destruição da hemicelulose. A quarta fase situa-se entre 330 e 370 °C, em que se supõe ocorrer à destruição da celulose. A quinta fase manifesta-se a temperaturas acima de 370 °C, quando o carvão vegetal é produzido. Está fortemente ligada ao início da degradação da lignina.

Schaffer (1973) apresenta as alterações sofridas pela madeira quando submetida a temperaturas superiores a 50 °C (**Tabela 3**).

**Tabela 3:** Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte.

Temperatura (°C)	Alterações na Madeira
55	A estrutura natural da lignina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer.
70	Começa a retração transversal da madeira.
110	A lignina lentamente começa a perder peso.
120	O teor de hemicelulose começa a diminuir, e alfa celulose começa a aumentar. A lignina começa a amolecer.
140	A água de impregnação é liberada.
160	A lignina se funde e começa a ressolidificar.
180	A hemicelulose começa rapidamente a perder peso depois de ter perdido 4 %. A lignina da membrana de pontuação escoa.
200	A madeira começa perder peso rapidamente. As resinas fenólicas começam a se formar e celulose a se desidratar.
210	A lignina solidifica. A celulose amolece e despolimeriza-se. As reações endotérmicas transformam-se em exotérmicas.
225	A cristalinidade da celulose diminui é retomada.
280	A lignina atinge 10 % de perda de peso. A celulose começa a perder peso.
288	Temperatura adotada para carbonização da madeira.
300	O cerne amolece irreversivelmente.
320	A hemicelulose é completamente degradada.
370	A celulose tem perda de 83 % do seu peso inicial.
400	A madeira é completamente carbonizada.

**Fonte:** SCHAFFER (1973).

#### 2.5.1 Influência da temperatura sobre celulose.

Vários autores desenvolveram trabalhos sobre a degradação da celulose devido à temperatura. Estes resultados foram sintetizados por Beall e Eickner (1970) e estão apresentados na **Tabela 4**.

**Tabela 4:** Degradação da celulose.

Ano	Autor	Temperatura (°C)	Metodologia utilizada	Observação
1951	Van Krevelen et al.	315	Não informa	Decomposição térmica
1954	Sergeeva e Vaivads	259 – 389	DTA	Reação exotérmica
		500 – 524	Não informa	Reação endotérmica
1956	Stamm	110 – 220		Taxa de degradação
1957	Golova e Krylova	300	Não informa	Decomposição térmica
1957	Schwenker e Pacsu	350 – 375	Não informa	Degradação térmica
1958	Major	170	Não informa	Degradação térmica
1961	Holmes e Shaw	418	Raios-X	Degradação térmica
1962	Domansky e Rendos	230	DTA	Reação exotérmica
		315 – 320		Reação endotérmica
1962	Murphy	100 – 250	Não informa	Degradação térmica
1964	Tang	240 – 310	TGA e DTA	Degradação térmica
1965	Millett e Goedken	180 – 260	Não informa	Degradação térmica
1965	Kilzer e Broido	200 – 280	Não informa	Desidratação celulose
1966	Bryce e Greenwood	156 – 337	Não informa	Degradação térmica
1966	Lipska e Parker	250 – 300	Não informa	Degradação térmica
1966	Broido	260	DTA e TGA	Início da perda peso
		285		Começou a degradar
1966	Chatterjee e Conrad	260 – 350	Não informa	Degradação térmica
1966	Lipska	300 – 400	Não informa	Degradação térmica
1967	Akita e Kase	280 – 320	TGA e DTA	Degradação térmica
1967	Kato e Takahashi	240 – 300	Não informa	Degradação térmica

**Fonte:** BEALL e EICKNER (1970).

Segundo Skaar (1976), em ambientes de alta umidade e calor a degradação da celulose ocorre predominantemente por hidrólise ácida, sendo que a taxa de degradação nesse caso é maior que a degradação térmica ou pirolítica. A hidrólise ácida faz com que sejam quebrados os grupos acetilas e com isso ocorra à formação de ácido acético, responsável pela degradação da madeira (SUCHSLAND e WOODSON, 1991).

A celulose é principalmente responsável pela produção de voláteis inflamáveis. A degradação ocorre com a glicosilação, desidratação, hidrólise, oxidação, descarboxilação e transporte. A degradação térmica da celulose pode ser acelerada na presença da água ácida e oxigênio. À medida que a temperatura aumenta, o grau de polimerização da celulose diminui, os radicais livres aparecem e os grupos de carbonila, carboxila e hidroperóxido são formados. As taxas de degradação térmica aumentam com calor contínuo (SCHNIEWIND, 1985). Como a celulose, é um material

semicristalino com áreas desordenadas, sua transição vítrea ocorre entre 200 e 250 °C, de acordo **Figura 11**.

### 2.5.2 Influência da temperatura sobre hemicelulose.

A hemicelulose é um material amorfo e essencialmente termoplástico. A transição vítrea dela, em geral, ocorre a temperaturas que variam entre 150 e 220 °C. Para madeiras nativas da Suécia, a transição vítrea é observada a 180 °C (ALFTHAN, 1973 e SALMEN, 1979) (**Figura 11**).

A estabilidade térmica da hemicelulose é menor que da celulose e da lignina. Segundo Schniewind (1985), as hemicelulose degradam a temperaturas que oscilam entre 200 e 260 °C.

Beall e Eickner (1970) realizaram uma revisão bibliográfica sobre a degradação térmica da hemicelulose. As informações encontradas por eles estão sintetizadas na **Tabela 5**.

**Tabela 5:** Degradação térmica da hemicelulose.

Ano	Autor	Temperatura (°C)	Metodologia utilizada	Observação
1954	Sergeeva e Vaivads	175 – 210	DTA	Reação exotérmica
		273 – 300	DTA	Decomposição térmica
1957	Kudo e Yoshida	150 – 280	Não informa	Decomposição térmica
1961	Arseneau	Max. 285	DTA	Reação exotérmica
1962	Domansky e Rendos	180 – 255	DTA	Reação exotérmica
1965	Kollmann e Fengel	150 – 180	Não informa	Decomposição térmica
1966	Fengel	180 – 200	Não informa	Decomposição térmica
1966	Domburgs et al.	200 – 275	Não informa	Reação exotérmica
		250 – 300		Reação endotérmica
1967	Ramiah e Goring	117 – 127	Não informa	Decomposição térmica

**Fonte:** BEALL e EICKNER (1970).

### 2.5.3 Influência da temperatura na lignina.

Analisando-se teoricamente o comportamento da lignina como sendo mais resistente à degradação térmica, explica-se o fato pela sua composição químico-

estrutural mais complexa, aliada ao fato da mesma possuir cerca de 65 % de carbono elementar (C) contra 45 % de C que ocorre normalmente na celulose (FENGEL e WENEGER, 1989).

Segundo Schniewind (1985), as reações da desidratação ocorrem em torno de 200 °C e são as responsáveis pela degradação térmica da lignina. Entre 150 e 300 °C, ocorre o rompimento dos enlaces do carbono. Em torno de 300 °C, as ligações laterais alifáticas começam a romper fora do anel aromático. Com a degradação térmica da lignina ocorrem reações exotérmicas entre os 225 e 450 °C. Segundo Becker et al. (1977), uma das causas da variação da temperatura de amolecimento é devido ao seu peso molecular. Quanto maior for este mais alta é a temperatura de amolecimento. Foi observado também que a água possui um efeito significativo na temperatura de amolecimento da lignina, pois esta decresce com o aumento do teor de umidade.

A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) é a temperatura na qual um polímero amorfo começa a amolecer é a temperatura de fusão cristalina ( $T_F$ ) é a temperatura na qual um polímero cristalino se funde. Assim, a lignina, sendo um polímero amorfo, possui um ponto de transição vítrea (ou amolecimento), que varia consideravelmente, conforme a origem e o método utilizado para o seu isolamento.

A **Tabela 6** sintetiza os resultados que vários autores desenvolveram sobre a degradação da lignina devida à temperatura.

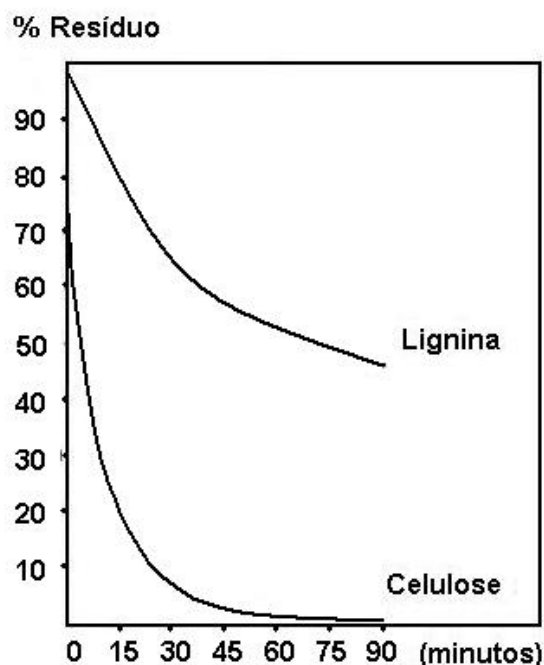
**Tabela 6:** Temperatura de transição vítrea de ligninas obtidas por vários métodos de isolamento.

Amostra	Temperatura de amolecimento (material seco °C)
Lignina de abeto (isolada com periodato)	193
Lignina de bétula (isolada com periodato)	179
Lignina de abeto (isolada com dioxano)	127
Lignina de álamo (isolada com dioxano)	134

**Fonte:** IPT, Manual de preservação de madeiras (1986).

Na **Figura 10** pode-se observar que a lignina é mais resistente à degradação térmica do que a celulose. As amostras de celulose e lignina foram aquecidas no formo elétrico desde temperatura ambiente até 300 °C. Pode-se observar que a lignina necessita de cerca de 65 minutos de exposição para ter seu peso reduzido à metade, enquanto que o tempo necessário para que tal ocorra para a celulose é de cerca de 5 minutos. Há 90 minutos, a celulose praticamente não deixa resíduos enquanto que a

lignina deixa um teor ainda por volta de 47 % do peso inicial (BRITO e BARRICHELO, 2001).



**Figura 10:** Resíduo de lignina e celulose da madeira em função do tempo de carbonização (BRITO e BARRICHELO, 2001).

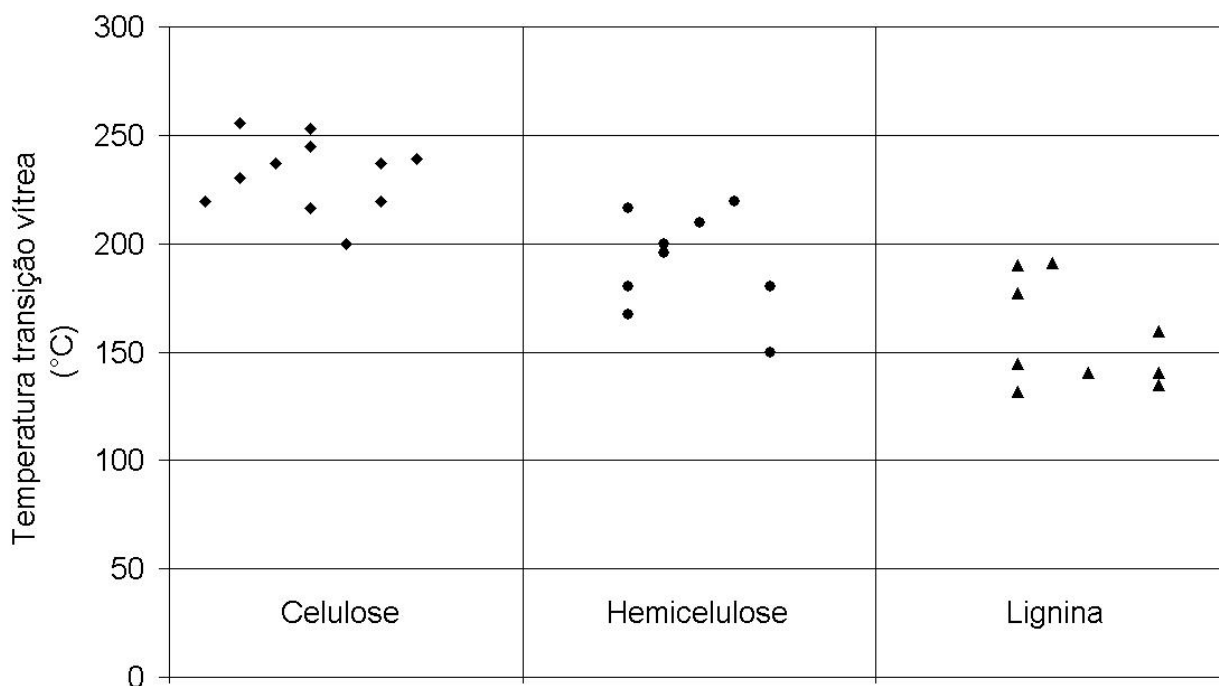
Beall e Eickner (1970) realizaram uma revisão bibliográfica sobre a degradação térmica da lignina. As informações encontradas por eles, estão sintetizadas na **Tabela 7**.

**Tabela 7:** Degradação térmica da lignina.

Ano	Autor	Temperatura (°C)	Metodologia utilizada	Observação
1957	Berkowitz	290 – 380	DTA	Início decomposição
		420		Reação exotérmica
1957	Kudo e Yoshida	280	Não informa	Início decomposição
		350 – 450		Taxa máxima ocorre
		450 – 500		Conclusão da reação
1960	Keylwerth e Christoph	320	DTA	Reação exotérmica
		510		Reação endotérmica
1961	Arseneau	230 – 265	DTA	
1962	Domansky e Rendos	280 – 300	DTA	Reação exotérmica
1965	Kollmann e Fengel	100 – 200	Não informa	Início decomposição
1967	Tang	280 – 344	TGA	
1967	Ramlah e Goring	130	Não informa	Início decomposição

**Fonte:** BEALL e EICKNER (1970).

A partir da revisão bibliográfica feita sobre a influência da temperatura sobre a celulose, hemicelulose e lignina, construiu-se a **Figura 11**, que resume as temperaturas de transição vítrea dos polímeros em estado seco.



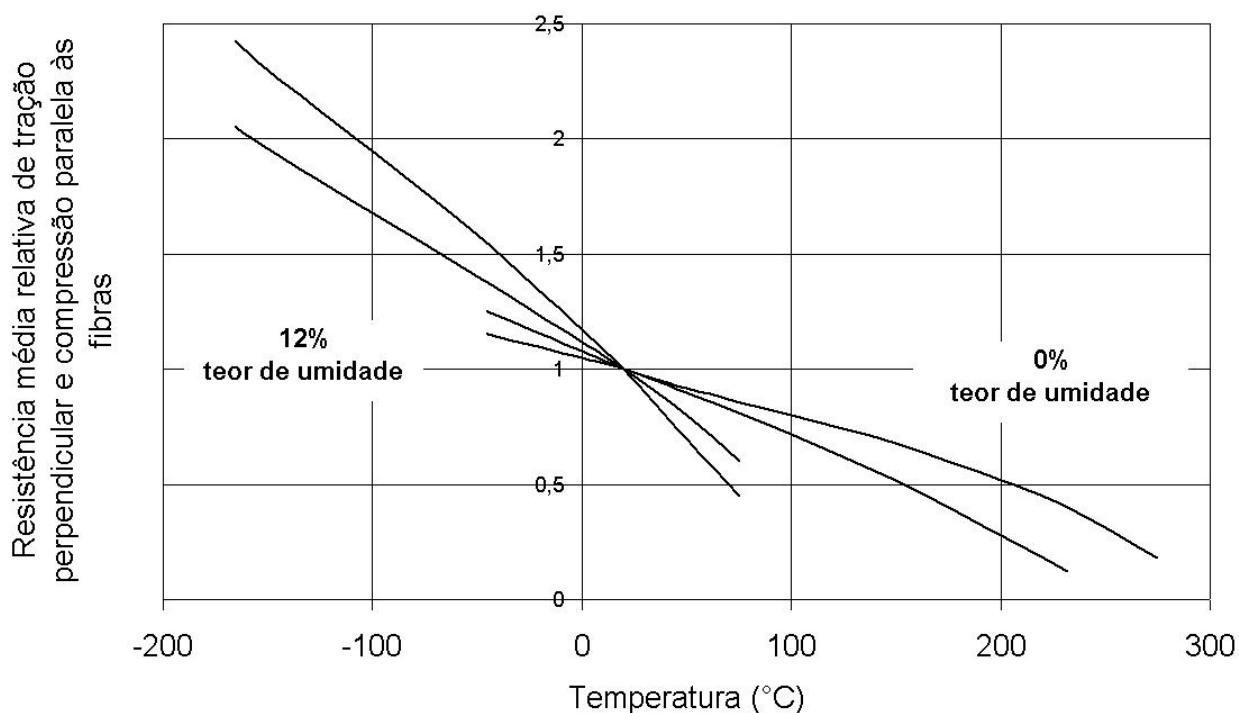
**Fonte:** BACK e SALEMÉN, (1982).

**Figura 11:** Transição vítrea dos componentes da madeira.

## 2.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.

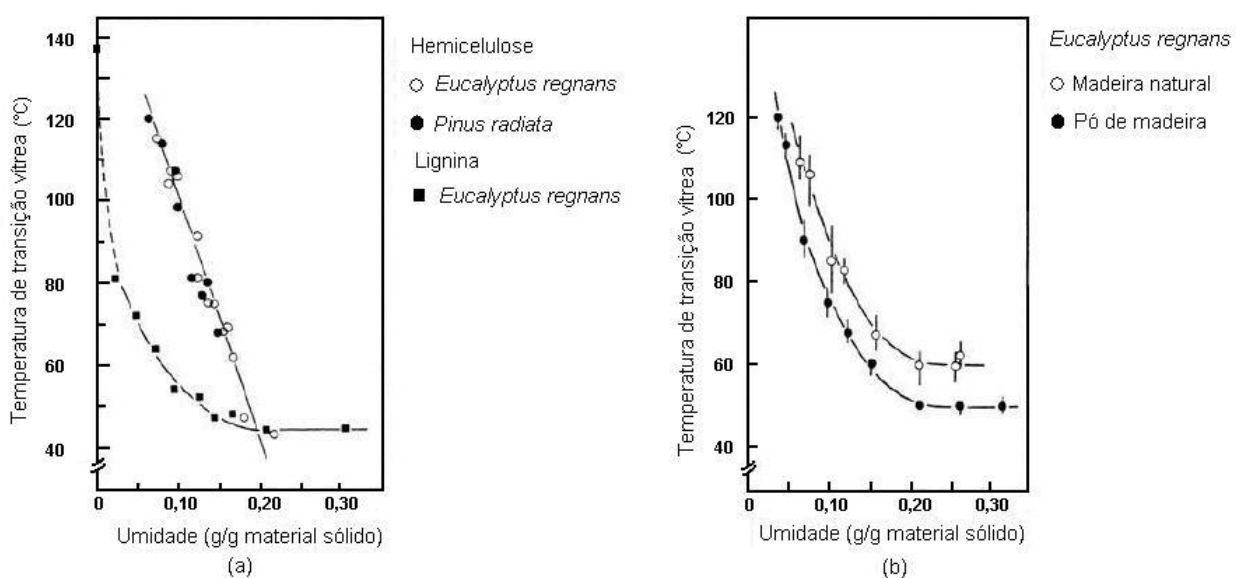
Segundo Gerhards (1982), Kollman e Côte (1968), Green et al. (1999), a resistência da madeira é relacionada em forma inversa à temperatura. Uma diminuição quase linear na resistência média de tração perpendicular e compressão paralela às fibras é observada em uma faixa de temperatura entre  $-200$  a  $+200$  °C (**Figura 12**).

Segundo Gerhards (1982), a temperatura tem dois tipos de efeitos na madeira: os efeitos imediatos que ocorrem somente quando a temperatura elevada é mantida; e os efeitos permanentes que resultam da degradação térmica dos polímeros de madeira. Os efeitos da temperatura imediatos são reversíveis, mas os efeitos permanentes não.



**Figura 12:** Efeito da temperatura na resistência a tração perpendicular e compressão paralela às fibras (GERHARDS, 1982).

Na medida que a umidade da madeira diminui a temperatura vítrea de seus componentes químicos aumenta. A **Figura 13** mostra a influência da umidade na madeira natural e pó da madeira de *Eucalyptus regnans* na transição vítrea na hemicelulose e lignina.



**Figura 13:** Transição vítrea da lignina e hemicelulose (IRVINE, 1984).



Quando as temperaturas são mantidas próximas de 55 a 65 °C, por períodos prolongados (2 a 3 meses), a hemicelulose começa amolecer e a celulose despolimeriza-se lentamente (FEIST et al., 1973; LEVAN et al., 1990). A degradação térmica é progressiva. Inicia-se com a volatilização dos gases da madeira e seguida da pirólise, isto é, a degradação dos polímeros da parede celular. Esta ocorre rapidamente a uma temperatura aproximada de 250 °C, seguida pela formação do carvão na ausência do ar e a combustão na presença do ar.

Muitos estudos têm demonstrado o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira, porém os resultados, até o momento se mostram contraditórios em alguns aspectos, principalmente no que diz respeito aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura. Essa divergência nos resultados está relacionada principalmente às diferentes formas com as quais foram conduzidos. Alguns pesquisadores não observaram qualquer alteração nas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura (COMBEN, 1955; LADELL, 1956; PETRI, 1963; PETRY e ANAYIN, 1966, citado por SALAMON, 1969; MILLETT e GERHARDS, 1972; CHRISTENSEN e GOUGH, 1975; TOMASELLI, 1977). Outros obtiveram aumento em algumas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura (KEYLWERTH, 1952; LADELL, 1956; SULZBERGER, 1953; SCHNEIDER, 1973; KOCH, 1971, 1972, 1973) citados por TOMASELLI, 1977; PRATT, (1986). Enquanto outros pesquisadores ainda observaram redução em algumas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura (KEYLWERTH, 1952; MACLEAN, 1953, 1954, 1956; COMBEN, 1955; SULZBERGER, 1953; GRAHAM, 1958; EDDY e GRAHAN, 1955; PETRI, 1963; KOZLIK, 1967, 1976; HUFFMAN, 1972; MILLETT e GERHARDS, 1972; ROSEN e BODKIN, 1981; BODIG e JAYNE, 1982; ROSEN e LAURIE, 1983; U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987; YOUNG e CLANCY, 2001; GERHARDS, 1982; BUCHANAN, 1998). A causa da perda de resistência pode ser atribuída ao processo de degradação sofrido pela madeira quando é submetida a temperaturas elevadas e altos teores de umidade, como no caso da vaporização das toras e posteriormente da pré-vaporização da madeira.

Segundo Chafe (1979), a redução da resistência da madeira tem relação com a degradação térmica de seus componentes. Outra possibilidade que pode contribuir para perda de resistência da madeira é a formação de fendas internas durante o processo de secagem da mesma.

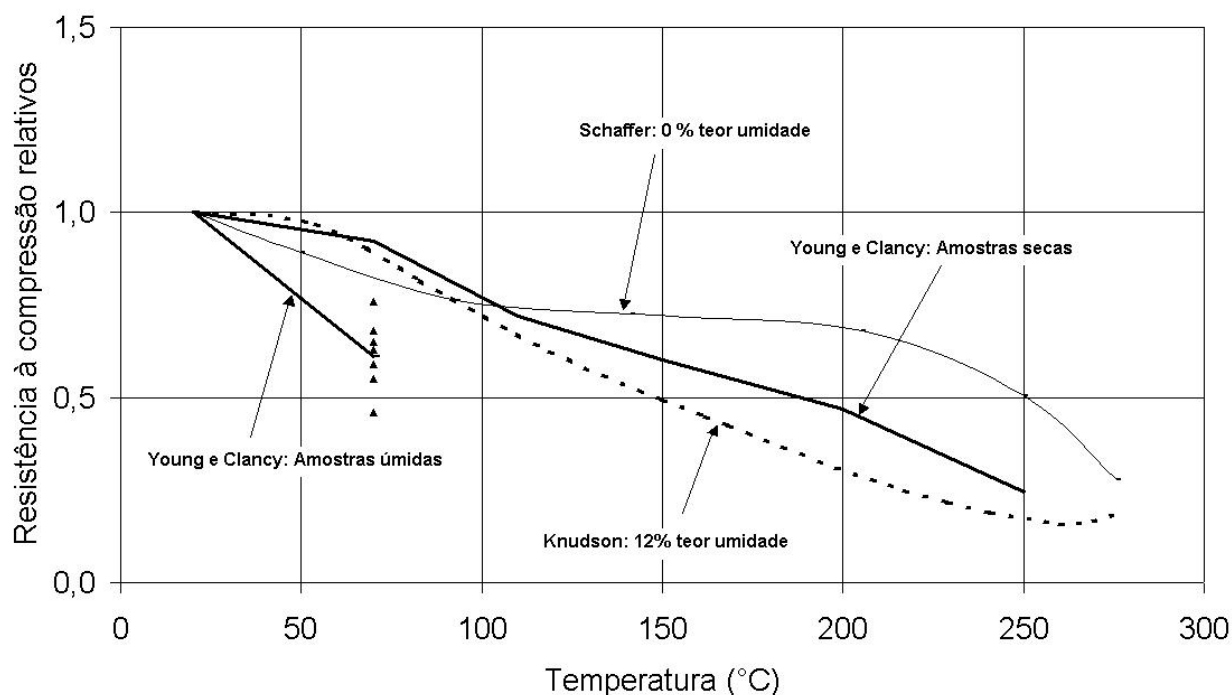
De forma geral, altas temperaturas reduzem as resistências da madeira como consequência da dilatação e da movimentação térmica das moléculas de seus constituintes. Acima de aproximadamente 100 °C, mesmo que de forma acanhada, já começa ocorrer a degradação térmica da madeira.

A seguir serão apresentadas informações sobre a influência da temperatura sobre as resistências à compressão paralela às fibras, à tração paralela e perpendicular às fibras, ao cisalhamento, módulo de elasticidade a flexão e ao embutimento da madeira.

#### 2.6.1 Resistência à compressão paralela às fibras.

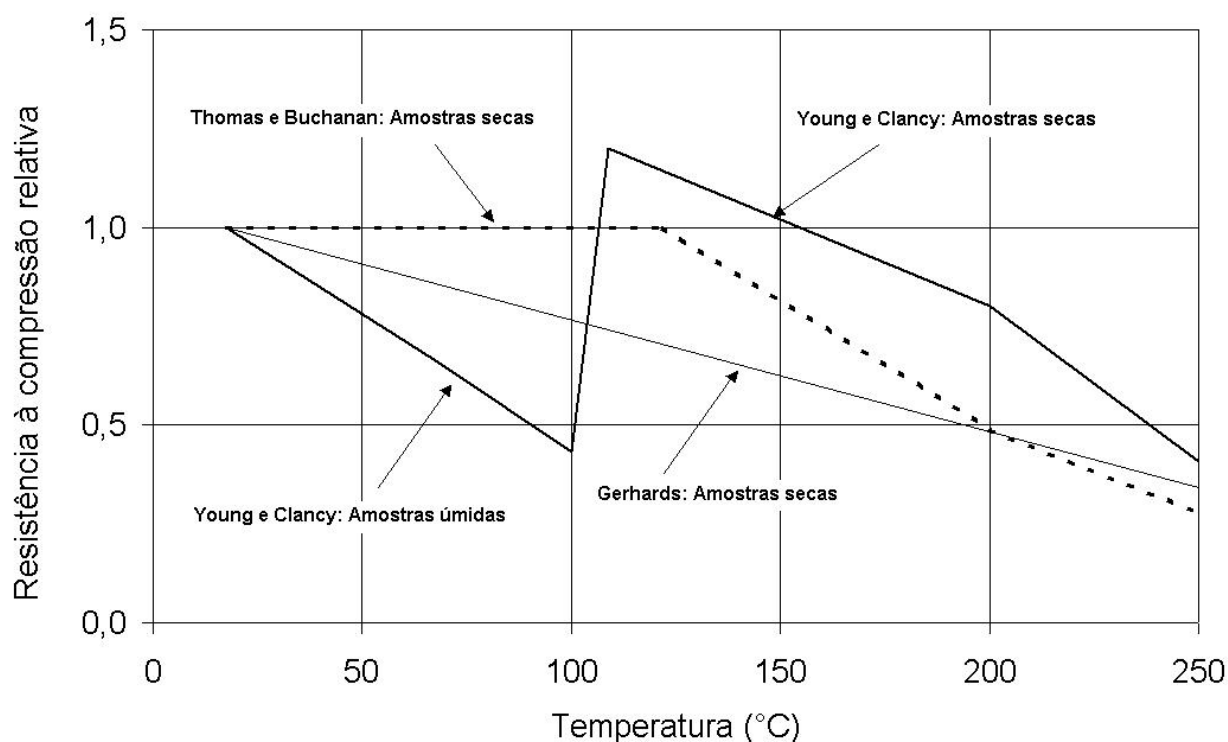
Gerhards (1982) realizou uma vasta revisão bibliográfica sobre a influência da umidade e da temperatura sobre as propriedades mecânicas das madeiras. Gerhards (1982), Thomas e Buchanan (1995) e Young e Clancy (2001) estudaram a influência da temperatura sobre a compressão paralela às fibras.

Na **Figura 14** observa-se a influência do teor de umidade sobre a compressão paralela às fibras. Para determinar essa influência, Schaffer (1973) utilizou amostras com 0 % de teor de umidade, Knudson e Schniewind (1975) amostras com 12 % teor de umidade e Young e Clancy (2001) amostras úmidas e secas. Observa-se que a resistência à compressão paralela às fibras dos corpos-de-prova de madeira seca é maior que a dos corpos-de-prova feitos com madeira úmida.



**Figura 14:** Efeito da temperatura e umidade na resistência à compressão paralela às fibras (SCHAFFER, 1973; KNUDSON e SCHNIEWIND, 1975; YOUNG e CLANCY, 2001).

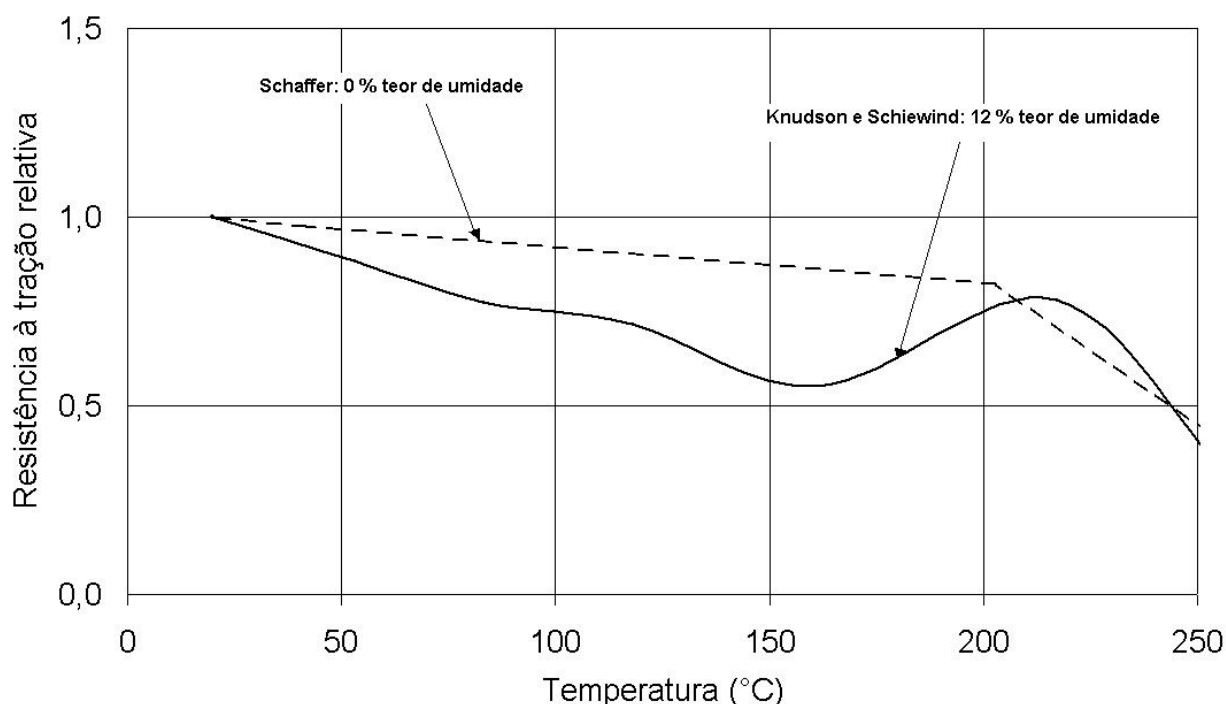
A **Figura 15** apresenta as curvas publicadas por vários autores para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras. Acima de 100 °C elas apresentam comportamento similar entre si. Gerhards (1982) utilizou amostras secas, de seção 5 × 5 mm, enquanto Young e Clancy (2001) utilizaram corpos-de-prova de 90 mm × 90 mm × 300 mm de *Pinus radiata* para amostras secas e úmidas. Não existem informações sobre os corpos-de-prova utilizados por Thomas e Buchanan (1995). Para amostras secas e uma temperatura acima de 100 °C, os resultados obtidos por Gerhards são inferiores aos outros autores.



**Figura 15:** Resistência à compressão paralela relativa da madeira (YOUNG e CLANCY, 2001).

### 2.6.2 Resistência à tração paralela às fibras.

Vários autores realizaram trabalhos sobre a influência da temperatura na resistência à tração paralela às fibras da madeira. Schaffer (1973) estudou a espécie *Pinus douglas* com teor de umidade 12 %, e massa específica entre 432 – 522 kg/m<sup>3</sup>. As dimensões dos corpos-de-prova foram de 3,2 mm de espessura e 25,4 mm de largura (**Figura 16**). Segundo ele, a resistência da madeira à tração paralela às fibras é fortemente dependente da parcela de celulose, enquanto a resistência à compressão depende da lignina. Portanto, se a madeira for submetida a temperaturas acima de 50 °C ocorrerão nela mudanças estruturais que afetarão sua resistência.

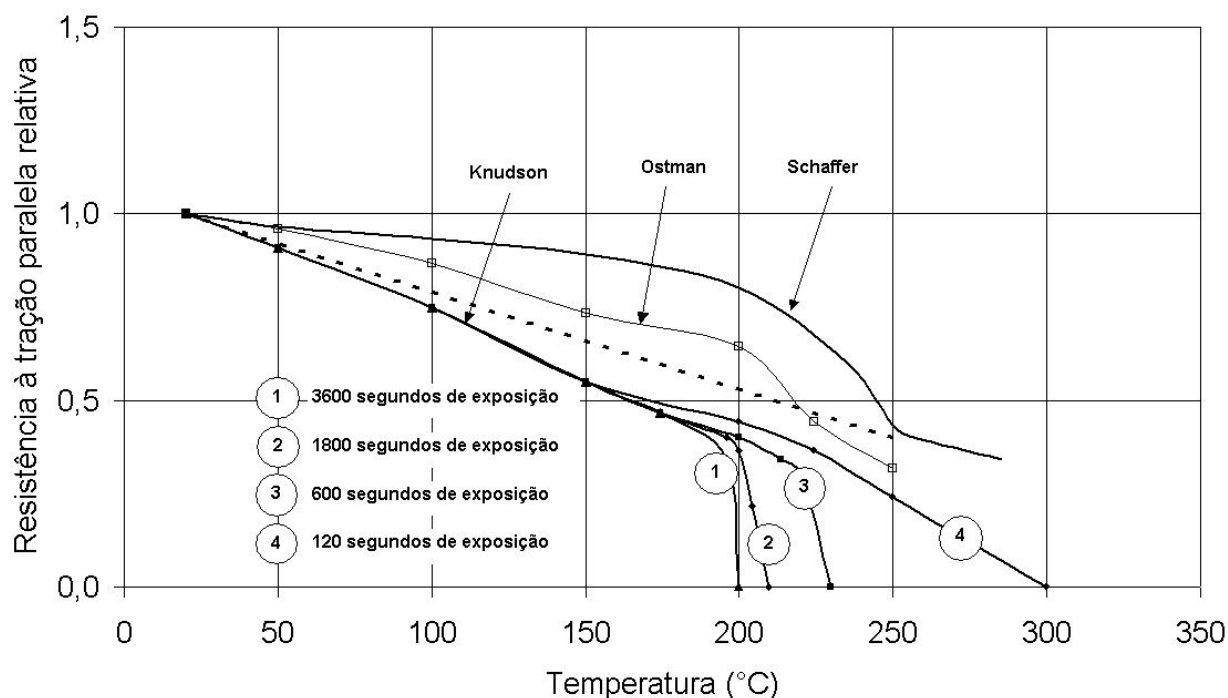


**Figura 16:** Resistência à tração paralela às fibras (SCHAFFER 1973).

Vários trabalhos foram encontrados sobre a influência da temperatura na resistência à tração paralela às fibras. Segundo Ifju (1964), a resistência à tração paralela às fibras depende fortemente da fração de celulose na madeira. Lau e Barrett's (1979) realizaram ensaios com corpo-de-prova com 7 – 11 % de teor de umidade, com dimensões de 90 mm x 35 mm, e tempo de 25 min de aquecimentos da superfície até 250 °C. Os resultados mostram que a resistência à tração paralela às fibras permanece baixa.

Buchanan (1998) compara os resultados de vários trabalhos (KNUDSON e SCHNIEWIND, 1975, OSTMAN, 1985 e SCHAFFER, 1986). Aquelas com maior resistências são para amostras secas. Os corpos-de-prova utilizados por Knudson e Schniewind (1975) foram confeccionadas em *Pinus douglas*, com 12 % de teor de umidade. Ostman (1985) estudou o comportamento da espécie abeto vermelho com teor de umidade de 12 % e corpos-de-prova pequenos de dimensões 1 mm x 10 mm.

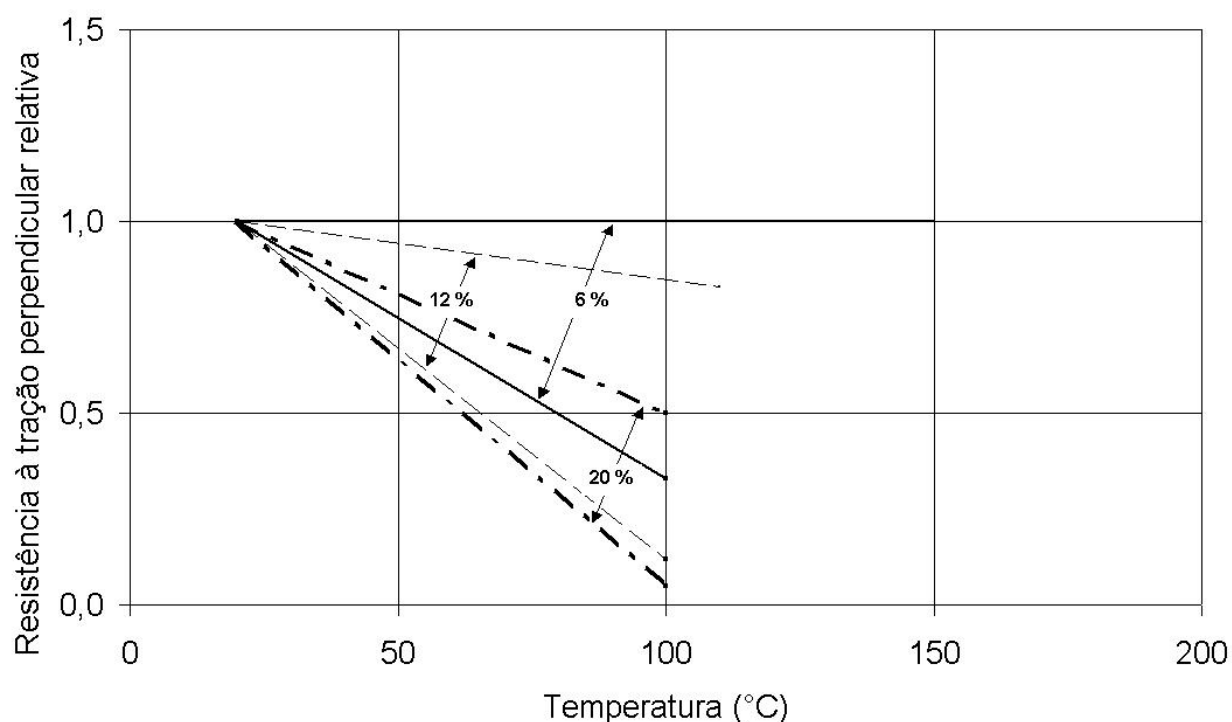
Na **Figura 17**, as curvas 1, 2, 3 e 4 mostram que a resistência à tração paralela às fibras diminui com o aumento da temperatura e com o tempo de exposição ao calor, sendo a curva 1 com 3600 segundos, a curva 2 com 1800 segundos, a curva 3 com 600 segundos e a curva 4 com 120 segundos de exposição.



**Figura 17:** Influência da temperatura sobre a resistência à tração paralela às fibras (BUCHANAN, 1998).

### 2.6.3 Resistência à tração perpendicular às fibras.

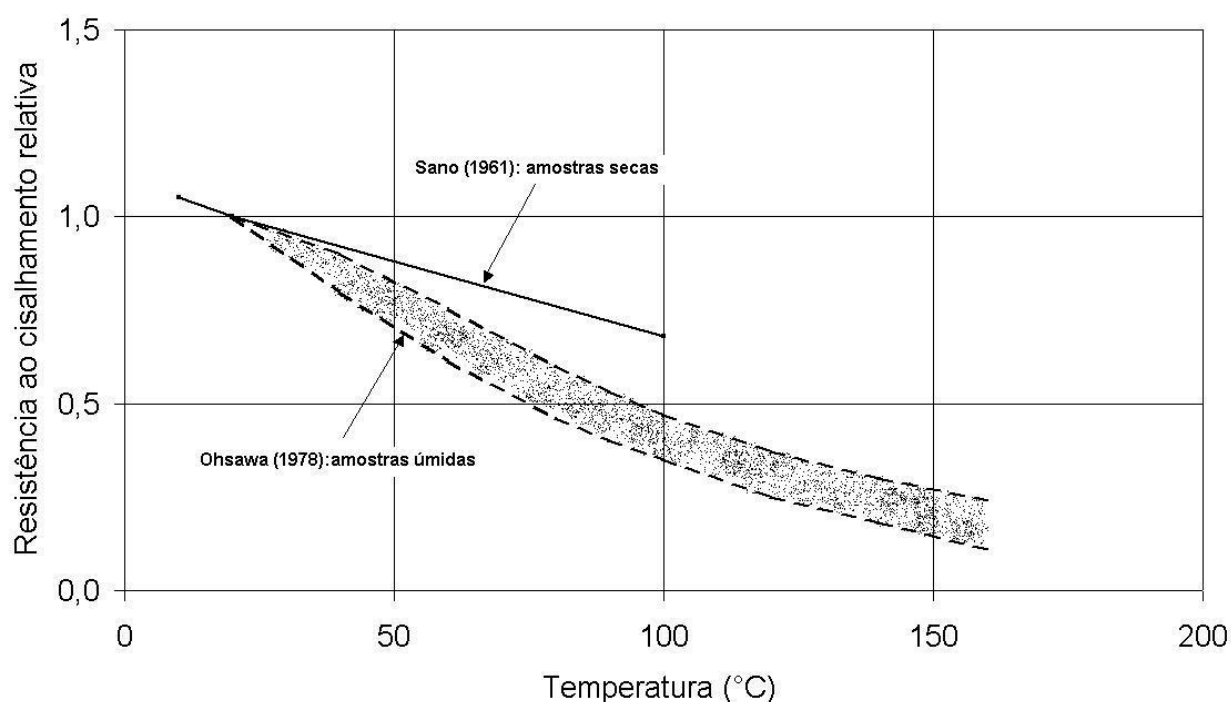
A **Figura 18** ilustra o comportamento da resistência à tração perpendicular às fibras na faixa de 20 a 100 °C. Observam-se três faixas de umidade 6 – 12 – 20 %, as quais apresentam superposição dos seus intervalos. A faixa que contém uma maior superposição corresponde à faixa de 6 e 12 %.



**Figura 18:** Influência da temperatura na resistência à tração perpendicular às fibras (GERHARDS, 1982).

#### 2.6.4 Resistência ao cisalhamento.

Gerhards (1982) apresenta a influência da umidade e da temperatura sobre a resistência relativa ao cisalhamento para uma faixa de temperatura de 20 a 160 °C (**Figura 19**). Em seu trabalho, ele compara os resultados obtidos por Ohsawa e Yoneda (1978) e Sano (1961). Observa-se que para as amostras úmidas, a resistência ao cisalhamento diminui rapidamente com o aumento da temperatura.

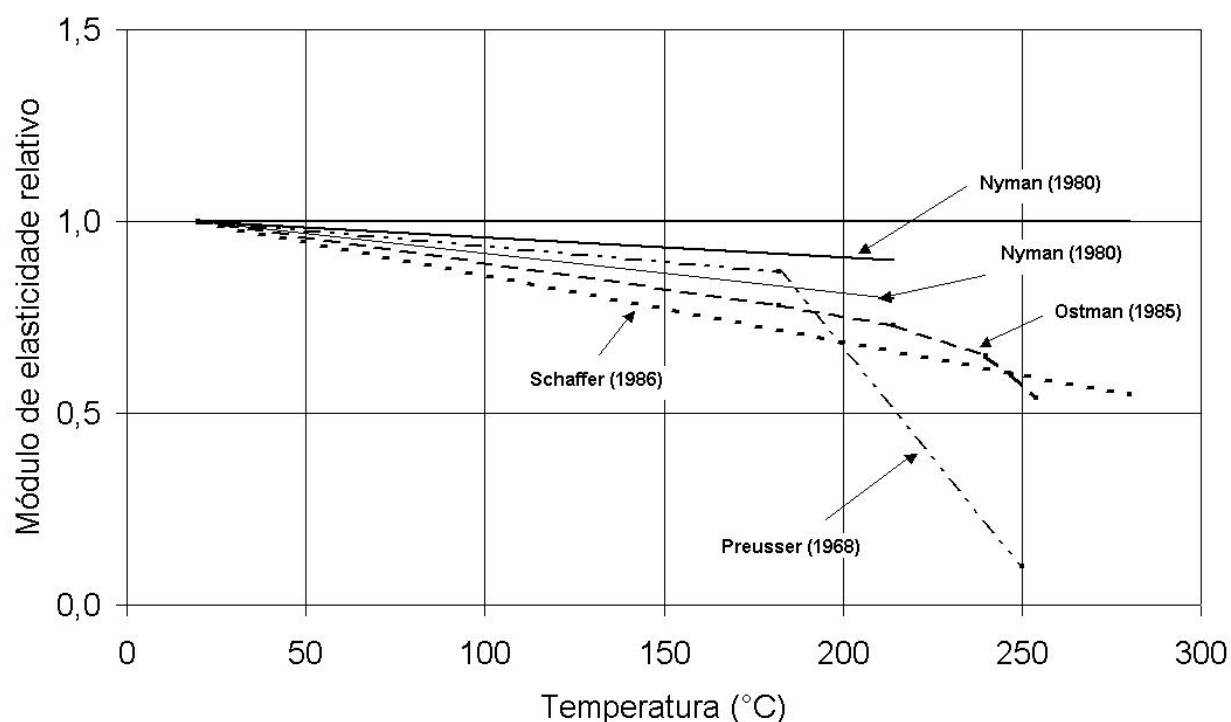


**Figura 19:** Influência da temperatura sobre a resistência ao cisalhamento da madeira (GERHARDS, 1982).

#### 2.6.5 Módulo de elasticidade à flexão (MOE).

A **Figura 20** ilustra, as curva publicadas por Nyman (1980) apud Gerhards (1982), da espécies *Spruce* e *pinho*, (SCHAFFER, 1986, OSTMAN, 1985 e PREUSSER, 1968). Os resultados mostram que o efeito da temperatura sobre o módulo de elasticidade paralelo às fibras, obtido a partir de um ensaio à flexão, apresentam um comportamento aproximadamente linear até os 180 – 200 °C, depois eles diminuem. Preusser (1968), apud Gerhards, mostra valores próximos a zero, para uma temperatura de 250 °C, enquanto os resultados apresentados por outros autores ainda têm uma porcentagem entre 50 – 70 % do módulo da elasticidade relativo.





**Figura 20:** Influência da temperatura em módulo de elasticidade a flexão (GERHARDS, 1982).

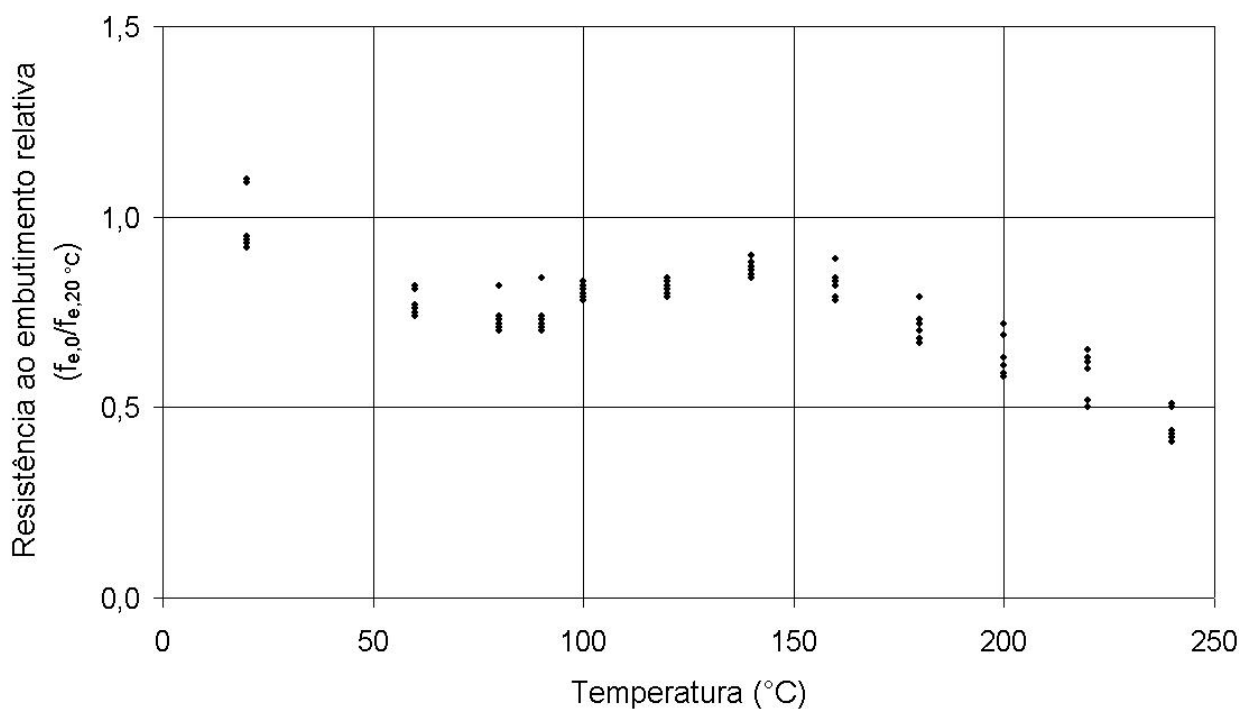
#### 2.6.6 Resistência ao embutimento da madeira.

Moraes et al. (2005) determinaram a influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras para o *Pinus sylvestris*. O estudo foi feito para uma faixa de temperatura de 20 – 240 °C, os corpos-de-prova utilizados foram de 20 mm × 48 mm × 112 mm com um diâmetro do parafuso de 8 mm.

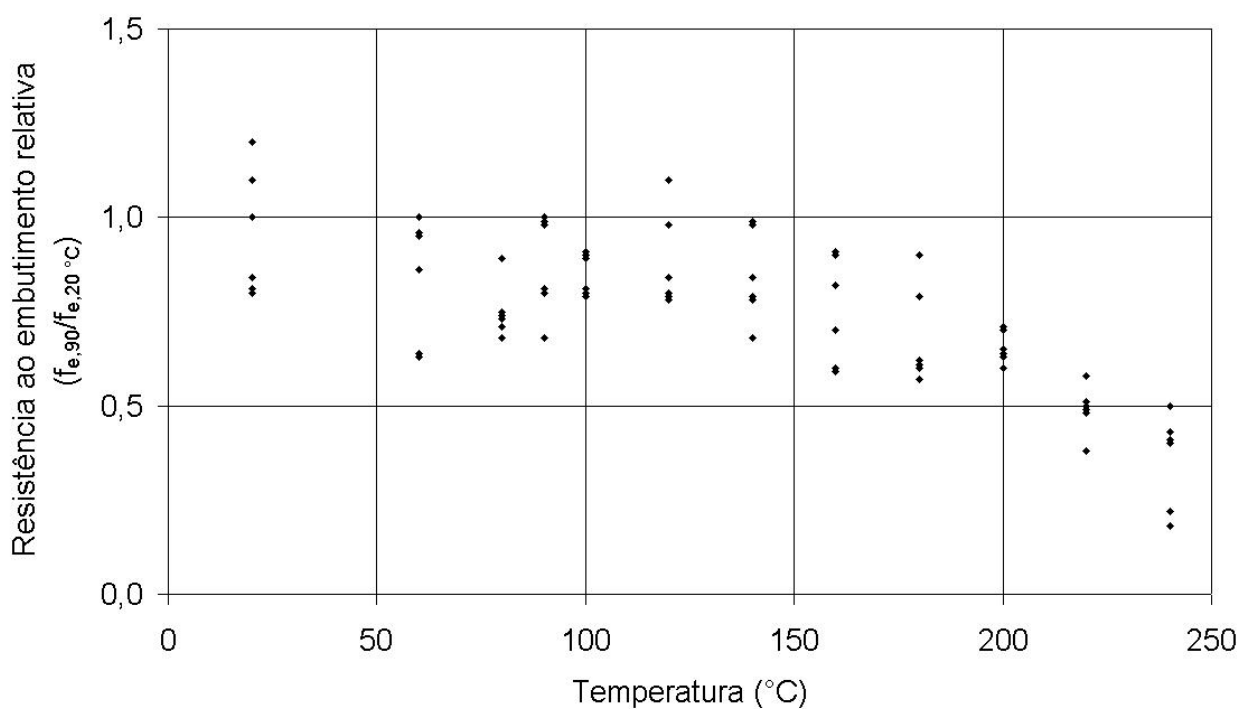
A **Figura 21** e **Figura 22** mostram a resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras da madeira submetida a altas temperaturas. Observa-se uma diminuição da resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras entre temperaturas de 20 – 80 °C. Após, há um aumento até os 100 °C, o qual se mantém aproximadamente até 160 °C, depois apresenta um valor mínimo à 240 °C.

Os autores verificaram que a umidade possui um papel importante na resistência ao embutimento da madeira, da mesma forma como ocorre com os outros tipos de ensaios de resistência mecânica da madeira.

Observa-se que, para resistência ao embutimento paralelo às fibras, os valores obtidos são menos dispersos que aqueles obtidos para a resistência ao embutimento perpendicular.



**Figura 21:** Influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento paralelo às fibra (MORAES et al, 2005).



**Figura 22:** Influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento perpendicular às fibra (MORAES et al, 2005).

### 3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos empregados na determinação da influência da temperatura sobre as resistências à compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, resistência ao cisalhamento e resistência ao embutimento do paricá oriundo de florestas plantadas.

#### 3.1 AMOSTRAS E CORPOS-DE-PROVA.

Os corpos-de-prova foram obtidos de madeira proveniente de uma classificação visual conforme a norma NBR 7190/97, anexo G. Estavam isentos de defeitos e retirados de regiões afastadas das extremidades das peças de pelo menos cinco vezes a menor dimensão da seção transversal da peça considerada, mas nunca menor que 30 cm.

Os corpos-de-prova foram associados de maneira a garantir grupos com massa específica estatisticamente homogênea (**Tabela 8**). A homogeneidade foi verificada pela análise de variância, usando o intervalo LSD para confiabilidade de 95 % (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

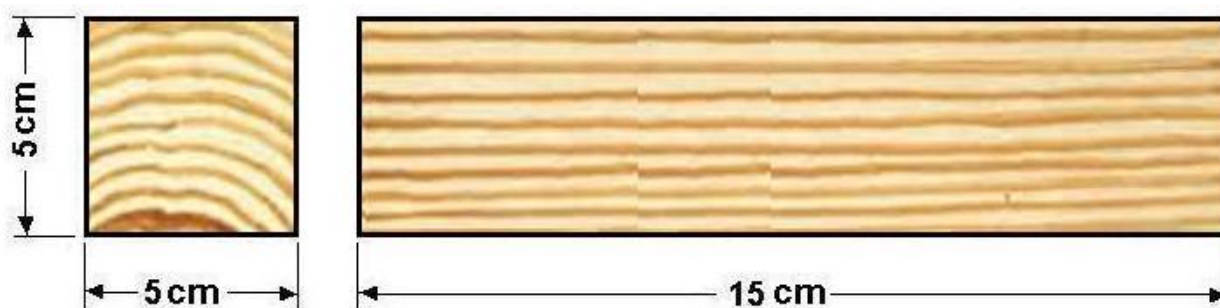
##### 3.1.1 Ensaio de compressão paralela às fibras.

Os ensaios de compressão paralela às fibras foram realizados em amostras de paricá com massa específica entre 296,61 e 464,53 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade médio de 11,65 %. A amostra era composta por 105 corpos-de-prova distribuídos em 15 grupos, cada grupo constituído por 7 corpos-de-prova. Os grupos foram ensaiados em faixas de temperatura entre 20 e 230 °C (**Tabela 8**).

**Tabela 8:** Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova.

Nível de Temperatura (°C)	Número de corpos-de-prova	Massa específica à temperatura ambiente (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio-padrão	CV (%)
20	7	368,18	41,90	11,38
40	7	370,67	40,59	10,95
50	7	371,71	40,63	10,93
60	7	372,65	40,51	10,87
70	7	374,07	39,52	10,57
80	7	376,25	39,07	13,38
90	7	378,80	38,00	10,03
100	7	379,60	37,43	9,86
110	7	380,76	37,83	9,94
130	7	382,09	39,09	10,23
150	7	383,62	40,36	10,52
170	7	384,74	39,46	10,26
190	7	387,19	41,56	10,73
210	7	388,75	42,59	10,96
230	7	389,84	42,35	10,86
<b>Total</b>	<b>105</b>			

As dimensões dos corpos-de-prova utilizados no ensaio, são os propostos pela norma NBR 7190/97, conforme a **Figura 23**.

**Figura 23:** Corpos-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras.

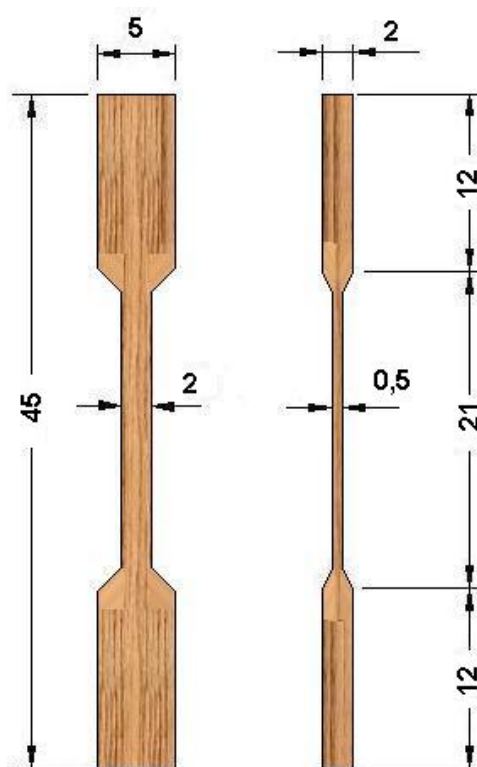
### 3.1.2 Ensaio de tração paralela às fibras.

Os ensaios foram realizados em amostras de paricá com massa específica entre 282,94 kg/m<sup>3</sup> e 443,47 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade médio de 11,74 %. A amostra era composta por 105 corpos-de-prova subdivididas em 15 grupos, cada grupo constituído por 7 corpos-de-prova. Os grupos foram ensaiados em faixas de temperatura entre 20 e 230 °C (**Tabela 9**).

**Tabela 9:** Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova.

Nível de Temperatura (°C)	Número de corpos-de-prova	Massa específica à temperatura ambiente (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio-padrão	CV (%)
20	7	346,99	42,67	12,30
40	7	349,18	44,05	12,61
50	7	350,97	43,47	12,38
60	7	353,47	42,96	12,15
70	7	354,48	42,87	12,09
80	7	356,61	42,33	11,87
90	7	357,81	42,54	11,89
100	7	359,09	43,27	12,05
110	7	359,46	43,38	12,07
130	7	360,35	43,53	12,08
150	7	361,63	43,32	11,98
170	7	363,85	43,25	11,89
190	7	365,14	42,98	11,77
210	7	367,28	44,26	12,05
230	7	369,06	45,56	12,35
<b>Total</b>	<b>105</b>			

As dimensões dos corpos-de-prova indicados pela NBR 7190/97 foram modificados para a utilização no ensaio da resistência à tração paralela às fibras **Figura 24**. A modificação foi feita na área submetida à tração, para que não existam concentrações de tensões dos corpos-de-prova e às garras de fixação da máquina de ensaio.



Dimensões em centímetros

**Figura 24:** Corpos-de-prova para ensaio de tração paralela às fibras.

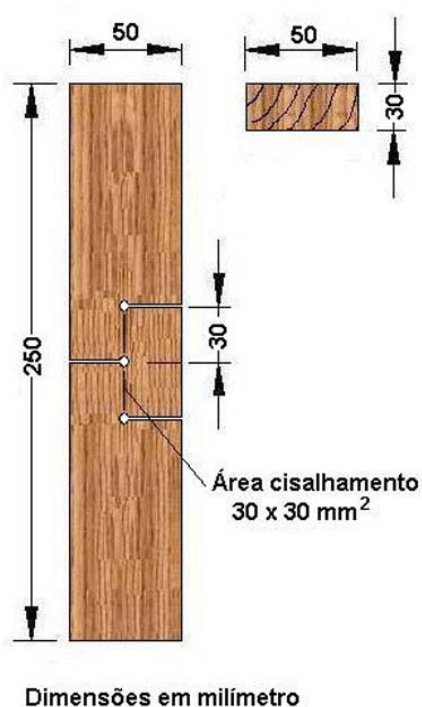
### 3.1.3 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

Os ensaios foram realizados em amostras de paricá com massa específica entre 331,7 e 444,23 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade médio de 11,63 %. A amostra era composta por 105 corpos-de-prova subdivididas em 15 grupos, cada grupo constituído por 7 corpos-de-prova. Os grupos foram ensaiados em faixas de temperatura entre 20 e 230 °C (**Tabela 10**).

**Tabela 10:** Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova.

Temperatura (°C)	Número de corpos-de-prova	Massa específica à temperatura ambiente (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio-padrão	CV (%)
20	7	380,08	31,71	8,34
40	7	381,25	31,16	8,17
50	7	381,69	31,11	8,15
60	7	382,58	30,92	8,08
70	7	383,66	30,03	7,83
80	7	385,59	30,10	7,81
90	7	386,73	29,65	7,67
100	7	390,10	33,47	8,58
110	7	391,20	33,13	8,47
130	7	391,54	33,19	8,48
150	7	392,12	33,49	8,54
170	7	392,70	33,58	8,55
190	7	393,76	32,73	8,31
210	7	394,81	32,05	8,12
230	7	395,82	32,00	8,08
<b>Total</b>	<b>105</b>			

As dimensões dos corpos-de-prova utilizados no ensaio da resistência ao cisalhamento são os propostos pela norma francesa e modificado por Szücs et al. (1998), conforme a **Figura 25**.

**Figura 25:** Corpos-de-prova para ensaio de cisalhamento.

### 3.1.4 Ensaio de embutimento paralelo às fibras.

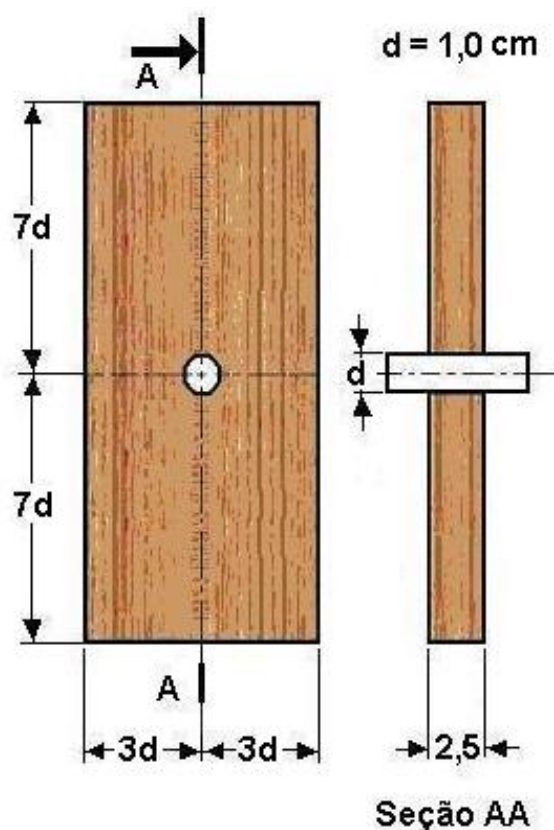
Os ensaios foram realizados em amostras de paricá com massa específica entre 303,57 e 454,04 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade médio de 11,74 %. A amostra era composta por 105 corpos-de-prova subdivididas em 15 grupos, cada grupo constituído por 7 corpos-de-prova. Os grupos foram ensaiados em faixas de temperatura entre 20 e 230 °C (**Tabela 11**).

**Tabela 11:** Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova.

Temperatura (°C)	Número de corpos-de-prova	Massa específica à temperatura ambiente (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio-padrão	CV (%)
20	7	353,68	35,58	10,06
40	7	354,81	36,11	10,18
50	7	355,76	36,33	10,21
60	7	356,75	36,20	10,15
70	7	357,88	36,76	10,27
80	7	358,65	35,97	10,03
90	7	360,26	34,68	9,63
100	7	361,10	34,77	9,63
110	7	362,23	35,82	9,89
130	7	364,13	36,59	10,05
150	7	365,36	36,58	10,01
170	7	368,13	37,09	10,08
190	7	370,52	40,66	10,97
210	7	371,53	41,36	11,13
230	7	373,92	44,89	12,00
<b>Total</b>	<b>105</b>			

As dimensões dos corpos-de-prova utilizados no ensaio da resistência ao embutimento paralelo às fibras são os propostos pela norma NF EN 383 (1993), conforme a **Figura 26**.





**Figura 26:** Corpos-de-prova para ensaio de embutimento paralelo às fibras.

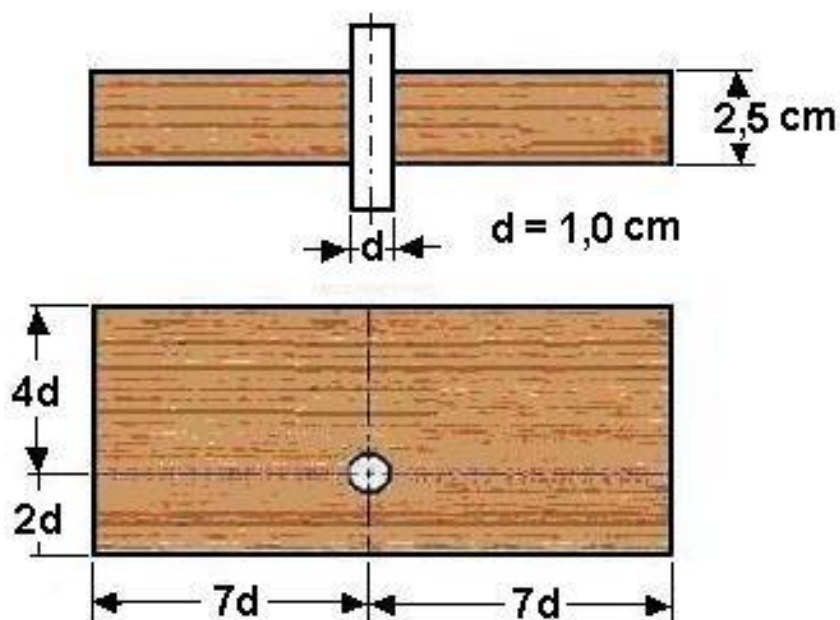
### 3.1.5 Ensaio de embutimento perpendicular às fibras.

Os ensaios foram realizados em amostras de paricá com massa específica entre 310,30 e 443,29 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade médio de 11,79 %. A amostra era composta por 105 corpos-de-prova subdivididas em 15 grupos, cada grupo constituído por 7 corpos-de-prova. Os grupos foram ensaiados em faixas de temperatura entre 20 e 230 °C (**Tabela 12**).

**Tabela 12:** Valores médios das massas específicas dos corpos-de-prova.

Temperatura (°C)	Número de corpos-de-prova	Massa específica à temperatura ambiente (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio-padrão	CV (%)
20	7	368,86	36,67	9,94
40	7	369,95	37,13	10,04
50	7	370,71	37,82	10,20
60	7	371,45	38,02	10,24
70	7	372,22	37,89	10,18
80	7	374,83	34,68	9,25
90	7	375,21	34,77	9,27
100	7	376,24	34,71	9,23
110	7	376,99	34,71	9,21
130	7	377,68	34,68	9,18
150	7	379,79	36,40	9,58
170	7	380,60	35,97	9,45
190	7	381,25	36,21	9,50
210	7	382,71	36,02	9,41
230	7	387,17	35,84	9,26
<b>Total</b>	<b>105</b>			

As dimensões dos corpos-de-prova utilizados no ensaio da resistência ao embutimento são os propostos pela norma NF EN 383 (1993), conforme a **Figura 27**.

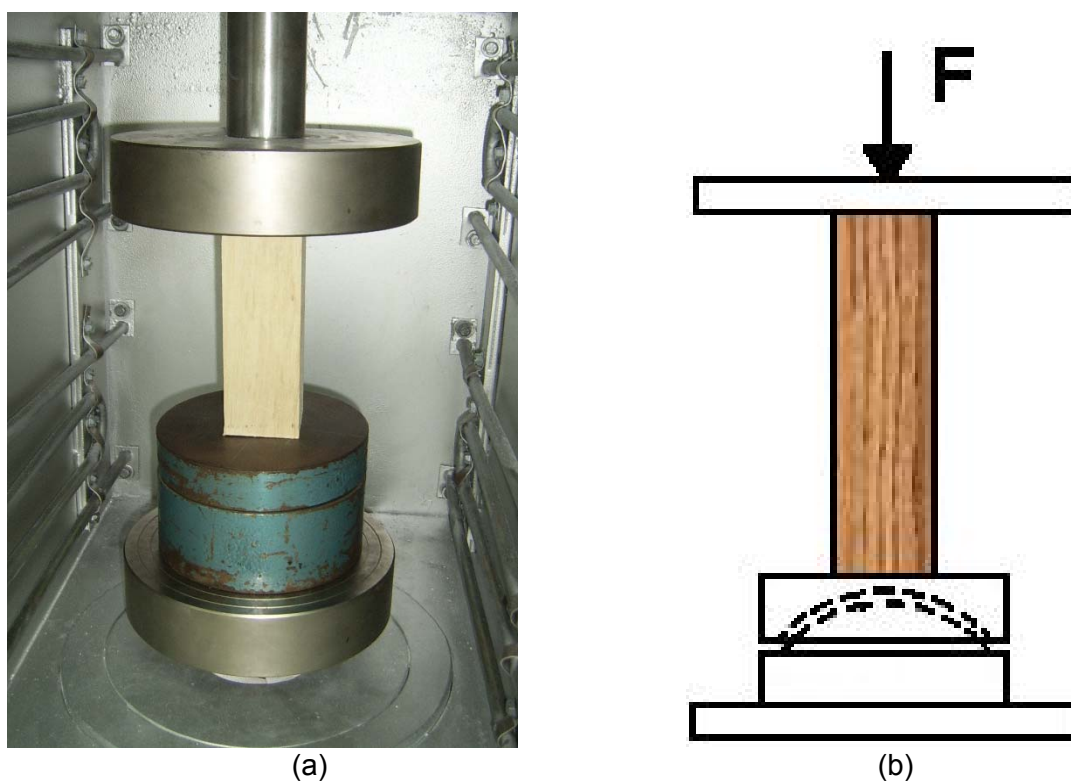
**Figura 27:** Corpos-de-prova para ensaio de embutimento perpendicular às fibras.

### 3.2 TESTES MECÂNICOS.

Para determinação das propriedades mecânicas dos corpos-de-prova submetidos a temperaturas elevadas foi utilizada uma máquina universal de ensaios marca Kratos, com uma célula de carga de 200 kN, com precisão de 0,2 kN. Durante todo o ensaio, os dados de força aplicada e de deslocamento foram registrados pelo sistema computacional de controle da máquina para análise posterior dos resultados.

#### 3.2.1 Ensaio de compressão paralela às fibras.

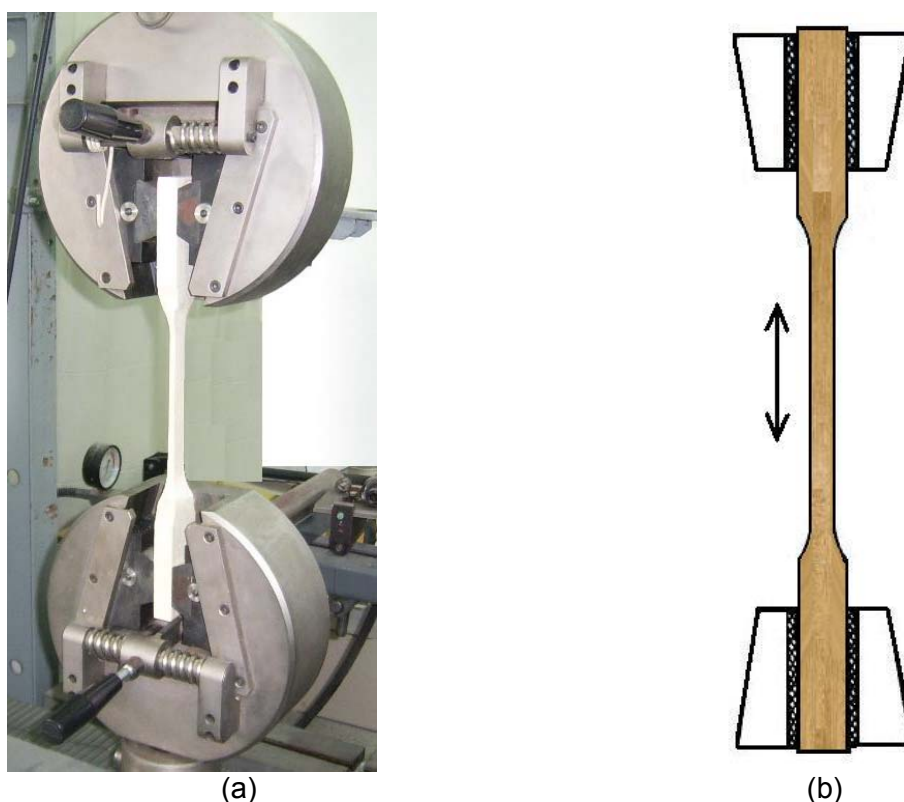
Os ensaios de compressão paralela às fibras foram realizados com dispositivos ilustrados pela **Figura 28**. Para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio, utilizou-se uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova. O deslocamento da travessa foi aplicado com uma velocidade de 2 mm/min. O tempo de duração dos ensaios situou-se entre 3 – 5 minutos. No ensaio de compressão utilizou-se a metodologia descrita na norma NBR 7190/97, porém não foram colocados os transdutores de deslocamento que poderiam ser danificados pela temperatura.



**Figura 28:** Arranjo do ensaio à compressão paralela às fibras.

### 3.2.2 Ensaio de tração paralela às fibras.

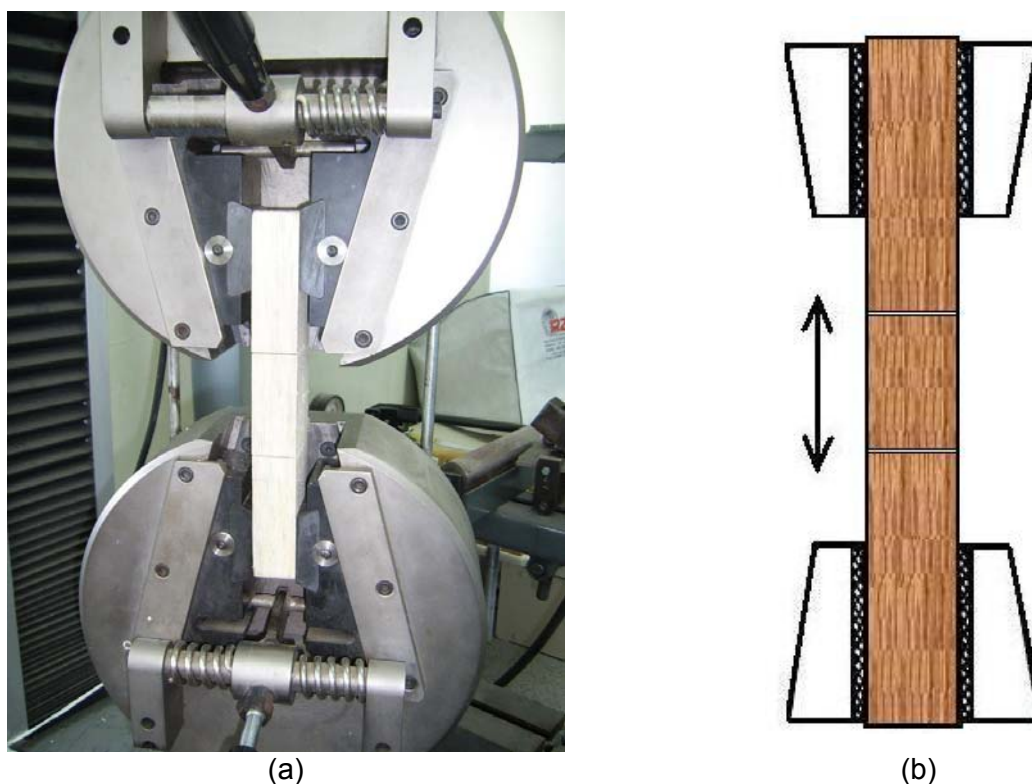
Os ensaios de tração paralela às fibras foram realizados com o dispositivo ilustrado pela **Figura 29**. Para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio utilizou-se uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova. O deslocamento da travessa foi aplicado com uma velocidade de 2 mm/min. O tempo de duração dos ensaios situou-se entre 3 – 5 minutos. No ensaio de tração utilizou-se a metodologia descrita na norma NBR 7190/97.



**Figura 29:** Arranjo de ensaio à tração paralela às fibras.

### 3.2.3 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

Os ensaios de cisalhamento paralelo às fibras foram realizados com o dispositivo ilustrado pela **Figura 30**. Para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio utilizou-se uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova. O deslocamento da travessa foi aplicado com uma velocidade de 2 mm/min. O tempo de duração dos ensaios situava-se entre 3 e 5 minutos. No ensaio de cisalhamento utilizou-se a metodologia descrita na norma Francesa NF EN 383 e modificada por Szücs et al. (1998).



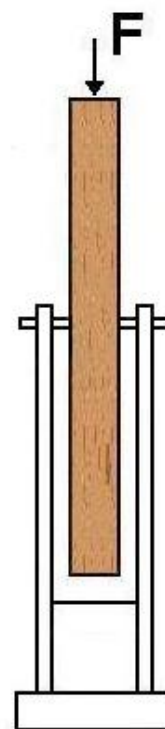
(a) (b)  
**Figura 30:** Arranjo de ensaio para cisalhamento.

#### 3.2.4 Ensaio de embutimento paralelo e perpendicular às fibras.

Os ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras foram realizados como o dispositivo ilustrado pelas **Figura 31** e **Figura 32**. O deslocamento da travessa foi aplicado com uma velocidade de 2 mm/min. Considera-se finalizado o ensaio quando o embutimento do parafuso na madeira alcançar o correspondente a um diâmetro. O diâmetro do parafuso utilizado para os ensaios de embutimento foi de 10 mm. O tempo de duração dos ensaios situou-se entre 5 – 10 minutos. No ensaio, aplicou-se a carga até a ruptura do corpo-de-prova ou até o embutimento atingir 10 mm.



(a)

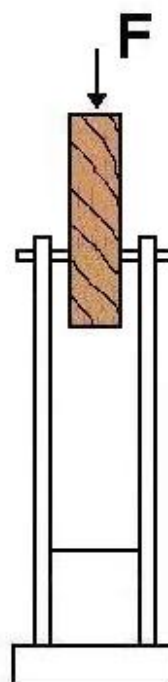


(b)

**Figura 31:** Arranjo de ensaio para embutimento paralelo às fibras.



(a)



(b)

**Figura 32:** Arranjo de ensaio para embutimento perpendicular às fibras.



Segundo a norma brasileira NBR 7190/97, os parafusos devem atender às especificações da norma para estruturas metálicas, para os ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras. Utilizou-se um parafuso de aço com diâmetro de 10 mm (**Figura 33**).



**Figura 33:** Parafuso utilizado em os ensaios de embutimento paralelo e perpendicular.

### 3.3 AQUECIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA.

Para realizar os ensaios de resistência mecânica a temperaturas elevadas foi preciso pré-aquecer os corpos-de-prova a fim de assegurar a homogeneização da temperatura no interior do corpo-de-prova. Foi utilizado um forno elétrico da marca Quimis com dimensões internas de 90 cm × 100 cm × 66 cm e controle automático de temperatura. A fim de obter medidas adicionais de temperatura foram instalados termopares no interior do equipamento. Os corpos-de-prova foram introduzidos no forno (**Figura 34 a**), aquecido na temperatura de ensaio, lá permanecendo durante 120 – 180 min. de acordo com tipo de ensaio. A introdução da cada corpo-de-prova no forno foi efetuada com defasagem entre 5 – 10 min, tempo estimado na duração do ensaio, de modo a garantir o mesmo tempo de exposição ao calor a cada um deles.



(a)



(b)

**Figura 34:** Forno de aquecimento dos corpos-de-prova.

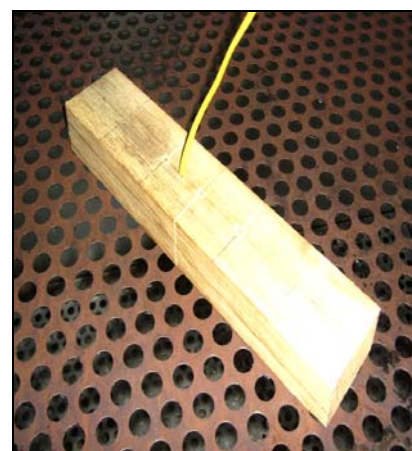
O tempo de aquecimento foi determinado a partir de ensaios preliminares, nos quais os corpos-de-prova eram introduzidos no forno pré-aquecido à temperatura de 200 °C. nos corpos-de-prova, foi realizada uma perfuração lateral de 2 mm de diâmetro, cuja base localizava-se no seu centro geométrico. Nessa perfuração foi introduzido um termo de tipo K, o qual permitiu a determinação do tempo necessário para que a temperatura no interior do corpo-de-prova atingisse a temperatura do forno, garantido, dessa maneira, a homogeneização da temperatura de todo o material aquecido (**Figura 35** a, b e c).



(a)



(b)

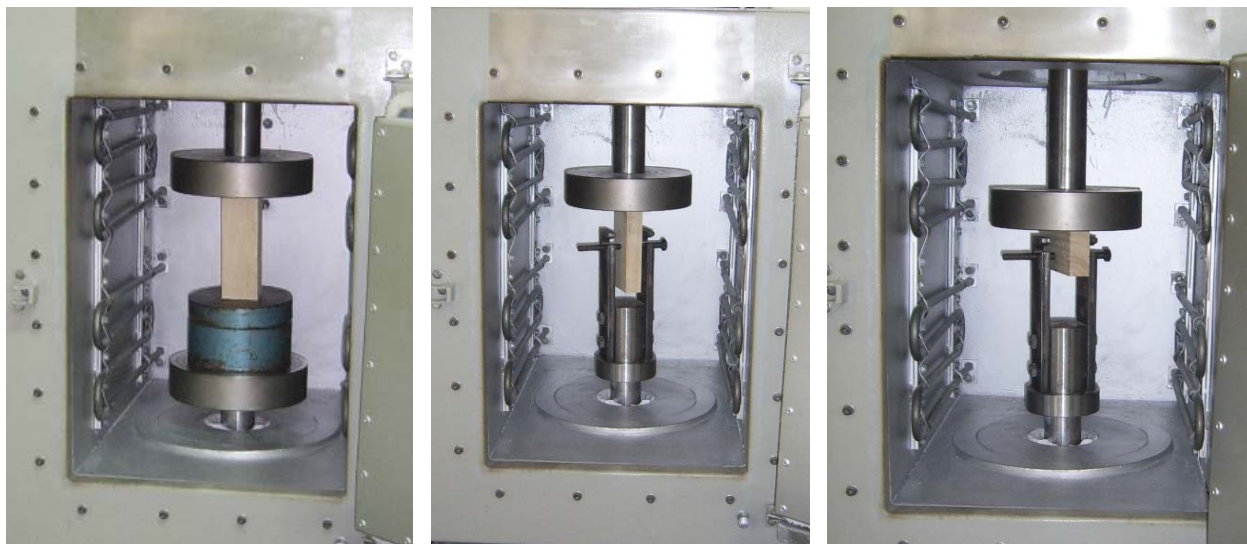


(c)

**Figura 35:** Corpos-de-prova com termopar.

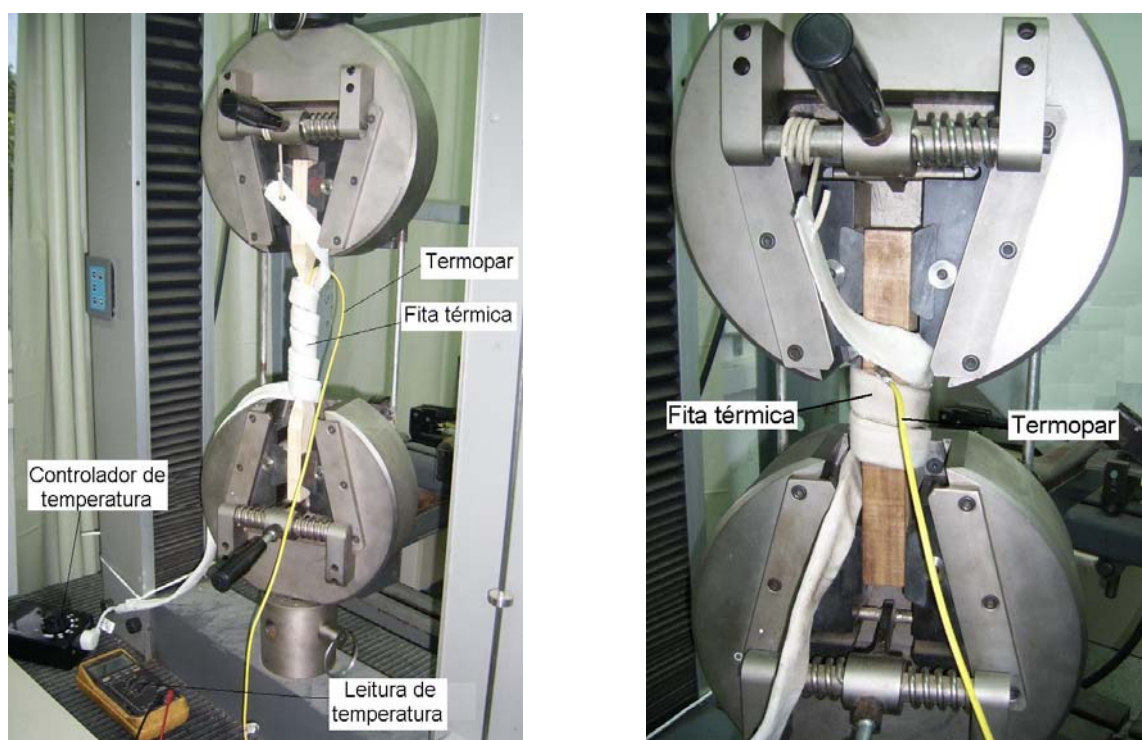


Durante a realização dos ensaios mecânicos utilizou-se uma câmara térmica, da marca Jung – J200, com dimensões internas de 37 cm × 50 cm × 52 cm e programador da temperatura. No interior da câmara estava instalado o dispositivo de compressão e embutimento paralelo e perpendicular às fibras ilustrado pela **Figura 36**.



**Figura 36:** Câmara térmica para realização de ensaio.

Para os ensaios de tração paralela às fibras e cisalhamento, a manutenção da temperatura durante o ensaio foi realizada por meio de uma fita térmica (**Figura 37**).



**Figura 37:** Controle e manutenção da temperatura durante o ensaio.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA.

Neste item serão apresentados os procedimentos para a determinação da resistência obtida a partir dos ensaios para diferentes níveis de temperaturas.

#### 3.4.1 Ensaio de compressão paralela às fibras.

O valor da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{co,T}$ ) é o valor da deformação específica ( $\varepsilon$ ) no instante da ruptura (**Figura 38 a**) foi determinado a partir da máxima força de compressão ( $F_{co,máx}$ ), obtida a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras para diferentes níveis de temperaturas, conforme Equação 1 e Equação 2.

$$f_{co,T} = \frac{F_{co,máx}}{A}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{u_p}{l_0}, \quad (2)$$

onde:

$F_{co,máx}$  : máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em (N), para um nível de temperatura T;

$A$  : área de seção transversal do corpo-de-prova no trecho comprimido depois o aquecimento em (mm<sup>2</sup>) (**Figura 23**);

$\varepsilon$  : deformação específica;

$u_p$  : deslocamento na plastificação;

$l_0$  : comprimento do corpo-de-prova mm (**Figura 23**).

#### 3.4.2 Ensaio tração paralela às fibras.

O valor da resistência à tração paralela às fibras ( $f_{to,T}$ ) é o valor da deformação específica ( $\varepsilon$ ) no instante da ruptura (**Figura 38 b**) foi determinado a partir da máxima força de tração ( $F_{to,máx}$ ) no instante da ruptura, obtida a partir de ensaios de tração paralela às fibras para diferentes níveis de temperatura dos corpos-de-prova, conforme Equação 3 e Equação 4.

$$f_{t0,T} = \frac{F_{t0,máx}}{A}, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{u_r}{l_0}, \quad (4)$$

onde:

$F_{t0,máx}$ : máxima força de tração aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em (N);

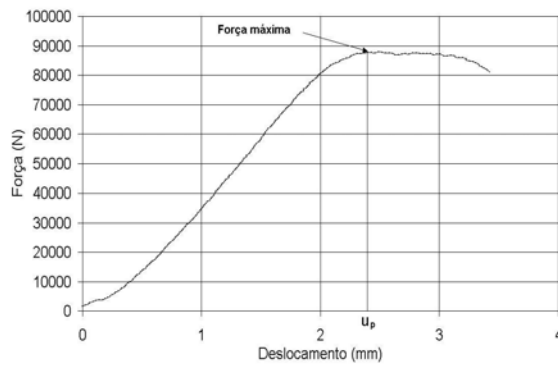
para um nível de temperatura T;

A : área de seção transversal do corpo-de-prova no trecho central após o aquecimento, em (mm<sup>2</sup>) (**Figura 24**);

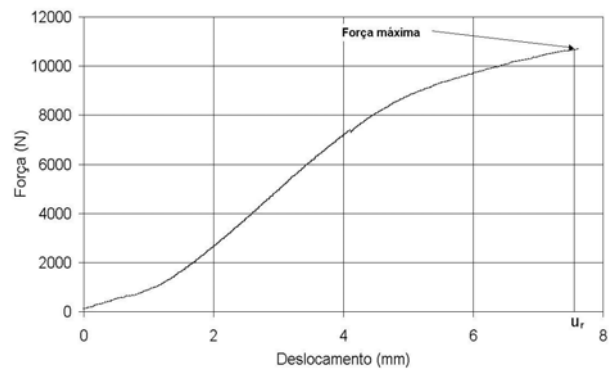
$\varepsilon$  : deformação específica;

$u_r$  : alongamento do corpo-de-prova no trecho central após o aquecimento, em (mm);

$l_0$  : é o comprimento central do corpo-de-prova, 210 mm (**Figura 24**).



(a) Compressão paralela às fibras



(b) Tração paralela às fibras

**Figura 38:** Diagrama força x deslocamento.

### 3.4.3 Ensaio cisalhamento paralelo às fibras.

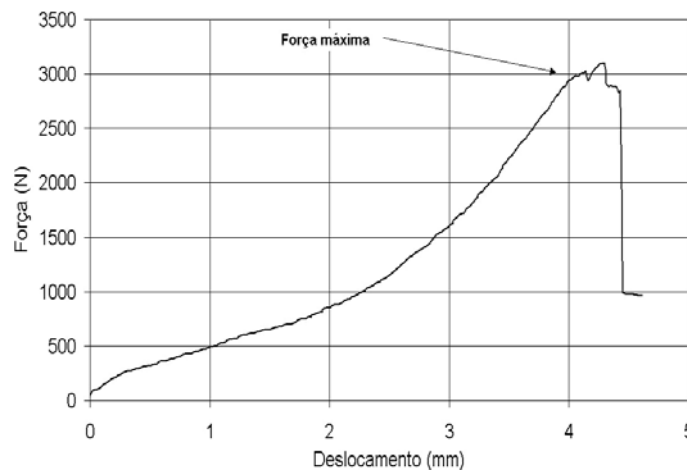
O valor da resistência ao cisalhamento ( $f_{v0,T}$ ) foi determinado a partir da máxima força de cisalhamento ( $F_{v0,máx}$ ) obtida a partir de ensaios de cisalhamento para diferentes níveis de temperatura, conforme Equação 5.

$$f_{v0,T} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{v0}}, \quad (5)$$

onde:

$F_{v0,máx}$ : máxima força de cisalhamento aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em (N), para a temperatura T;

$A_{v0}$ : área final de seção transversal do corpo-de-prova no trecho central após o aquecimento em (mm<sup>2</sup>) (**Figura 25**).



**Figura 39:** Diagrama força de cisalhamento paralela às fibras x deslocamento.

#### 3.4.4 Ensaio de embutimento paralelo e perpendicular às fibras.

O valor da resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras ( $f_{h,T}$ ) foi determinado no patamar plástico de embutimento ( $F_{máx}$ ), obtido dos diagramas dos ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras (**Figura 40 a e b**), para os diferentes níveis de temperatura dos corpos-de-prova, conforme Equação 6.

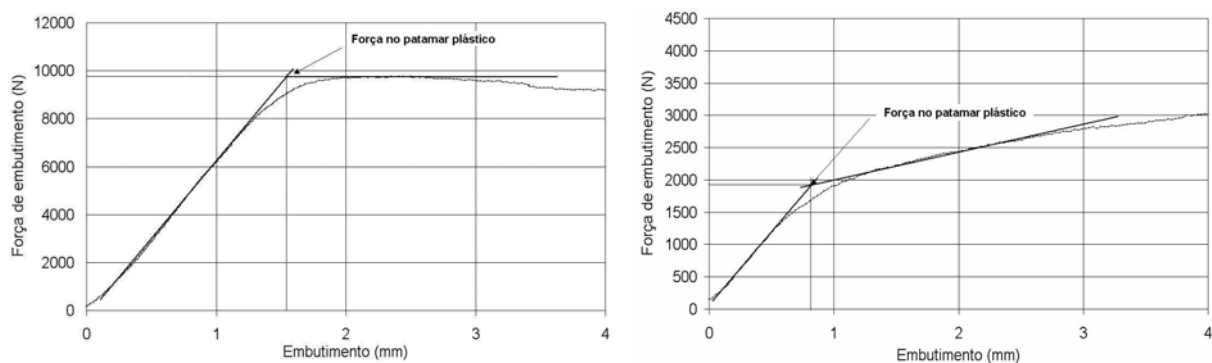
$$f_{e,T} = \frac{F_{máx}}{td}, \quad (6)$$

onde:

$F_{máx}$ : força no patamar plástico, na direção paralela e normal, em (N), para a temperatura T;

$t$ : é a espessura do corpo-de-prova, em (mm);

$d$ : é o diâmetro do pino, em (mm) (**Figura 26 e Figura 27**).



(a) Embutimento paralelo às fibras

(b) Embutimento perpendicular às fibras

**Figura 40:** Diagrama força x embutimento.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.

A determinação do teor de umidade no momento do ensaio foi realizada utilizando-se os próprios corpos-de-prova. Após a realização dos ensaios mecânicos, os corpos-de-prova foram pesados para a determinação da massa no momento do ensaio ( $m_e$ ), logo foram submetidos à secagem a uma temperatura máxima de  $103 \pm 2$  °C, conforme a norma NBR 7190 (1997), até a ocorrência de uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5 % da última massa medida, esta sendo considerada a massa seca ( $m_s$ ). Determinou-se o teor de umidade pela Equação 7.

$$U = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100, \quad (7)$$

onde:

$m_e$ : massa inicial da madeira, em gramas;

$m_s$ : massa da madeira seca, em gramas.

### 3.6 MASSA ESPECÍFICA APARENTE.

Para a determinação da massa específica dos corpos-de-prova, antes dos ensaios, foram seguidas as prescrições da norma NBR 7190 (1997), conforme a Equação 8.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v}, \quad (8)$$

onde:

$m$  : massa da madeira, em quilogramas;

$v$  : volume da madeira, em metros cúbicos.

## 4 Resultados e discussões

Neste trabalho foram realizados os ensaios de compressão e tração paralelas às fibras, de cisalhamento paralelo às fibras e embutimento paralelo e perpendicular às fibras, entre 20 e 240 °C. Os resultados de cada ensaio serão apresentados e discutidos a seguir.

Todos os valores de resistência foram submetidos a testes para identificar diferenças estatísticas entre os vários níveis de temperatura. Foram realizadas análises de variância (MONTGOMERY e RUNGER, 2003), com uma confiabilidade de 95 %, para identificar diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes níveis de temperatura, teste de valores espúrios, determinar os erros das médias e intervalos de confiança.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.

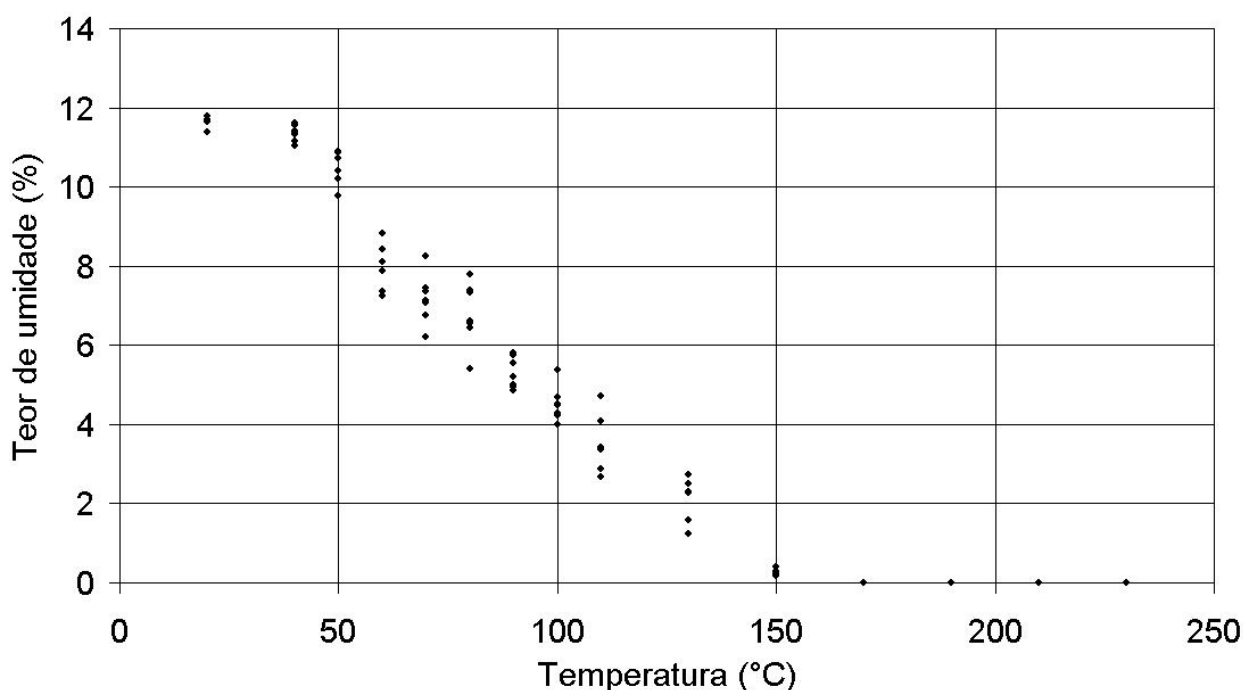
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras a fim de determinar a influência da temperatura sobre a resistência à compressão paralela às fibras do paricá.

#### 4.1.1 Teor de umidade dos corpos-de-prova após o ensaio.

A **Figura 41** ilustra o teor de umidade dos corpos-de-prova após um período de aquecimento de 180 minutos no forno e 5 minutos de ensaio mecânico. Observa-se que o teor de umidade diminui linearmente com o aumento da temperatura do ensaio. Os corpos-de-prova expostos a um nível de temperatura de 150 °C apresentavam 0 % de umidade. Segundo Young e Clancy (2001), acima de 100 °C, a umidade contida na parede celular começa a ser liberada pela superfície da madeira, dependendo da permeabilidade. Na medida que a temperatura aumenta, observa-se uma perda de peso dos corpos-de-prova, provavelmente ligado à degradação térmica dos componentes da madeira (SCHAFFER, 1973).

Os estudos realizados por Drow (1975), Leont'ev (1960) e Wilson (1932), indicam que o teor de umidade é um fator importante a considerar. Gerhards (1982) também mostrou isso.

Segundo Odeen (1970) e Schaffer (1973), em madeiras aquecidas existe movimento interno da umidade. Este movimento está relacionado com a pressão interna do vapor de água. Quando a madeira é aquecida a uma temperatura acima de 150 °C, toda a umidade contida na parede celular é evaporada. Conforme citado por Schaffer (1973), a 140 °C a água contida nos componentes da madeira começa a ser liberada e os componentes químicos começam a degradar.

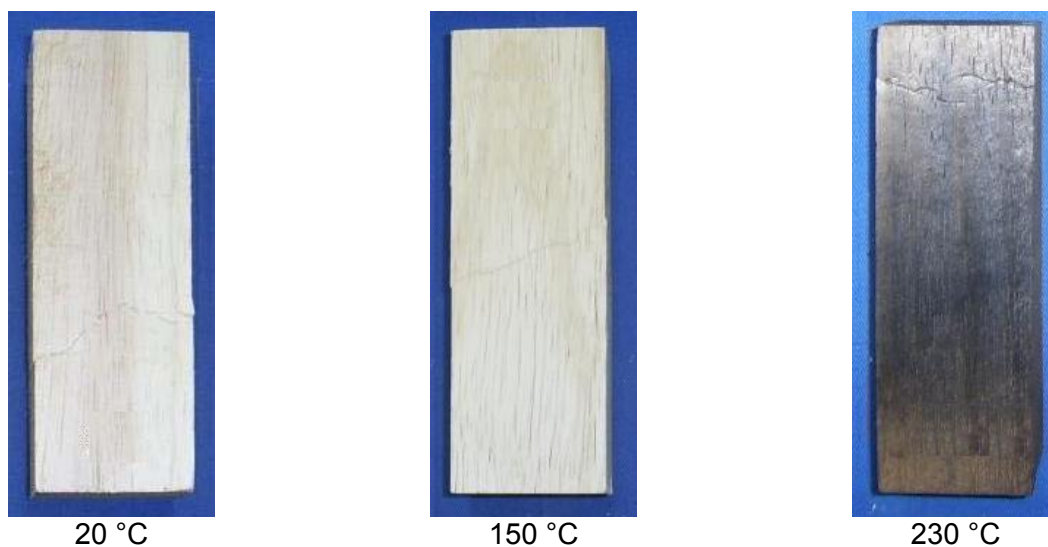


**Figura 41:** Teor de umidade dos corpos-de-prova após os ensaios.

#### 4.1.2 Alteração da coloração dos corpos-de-prova.

Durante o aquecimento dos corpos-de-prova, entre 20 e 230 °C, ocorreram mudanças de cor na madeira. Observa-se a alteração da coloração dos corpos-de-prova na parte externa e interna da madeira. Estas alterações foram mais marcantes nos níveis mais elevados de temperatura, principalmente em temperaturas superiores a 150 °C (**Figura 42**).

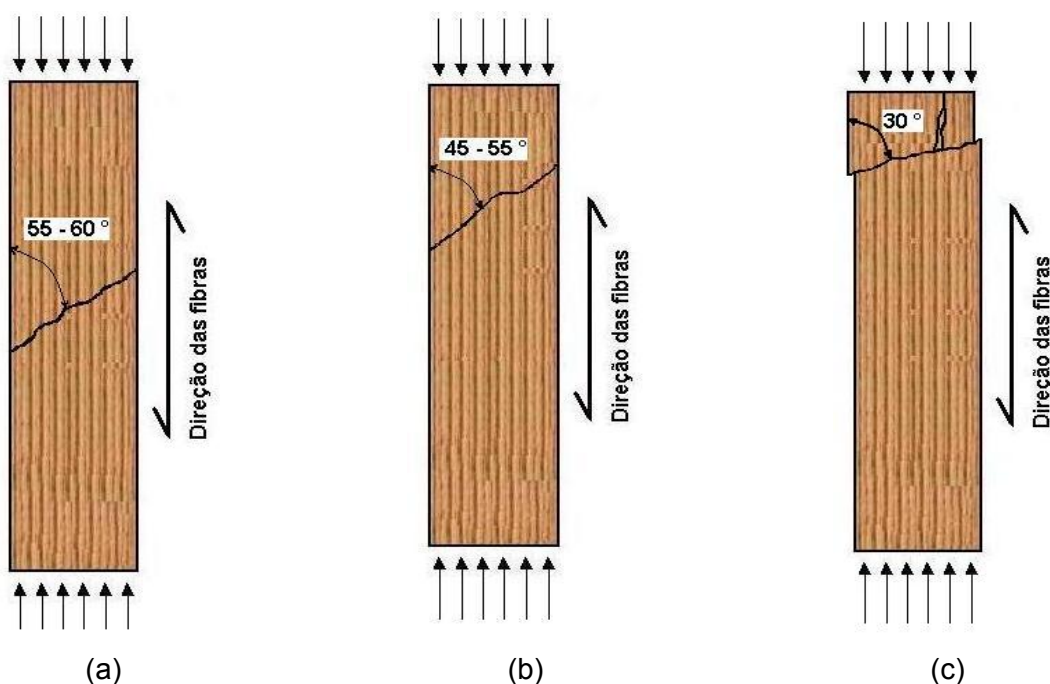




**Figura 42:** Variação da coloração dos corpos-de-prova em função da temperatura.

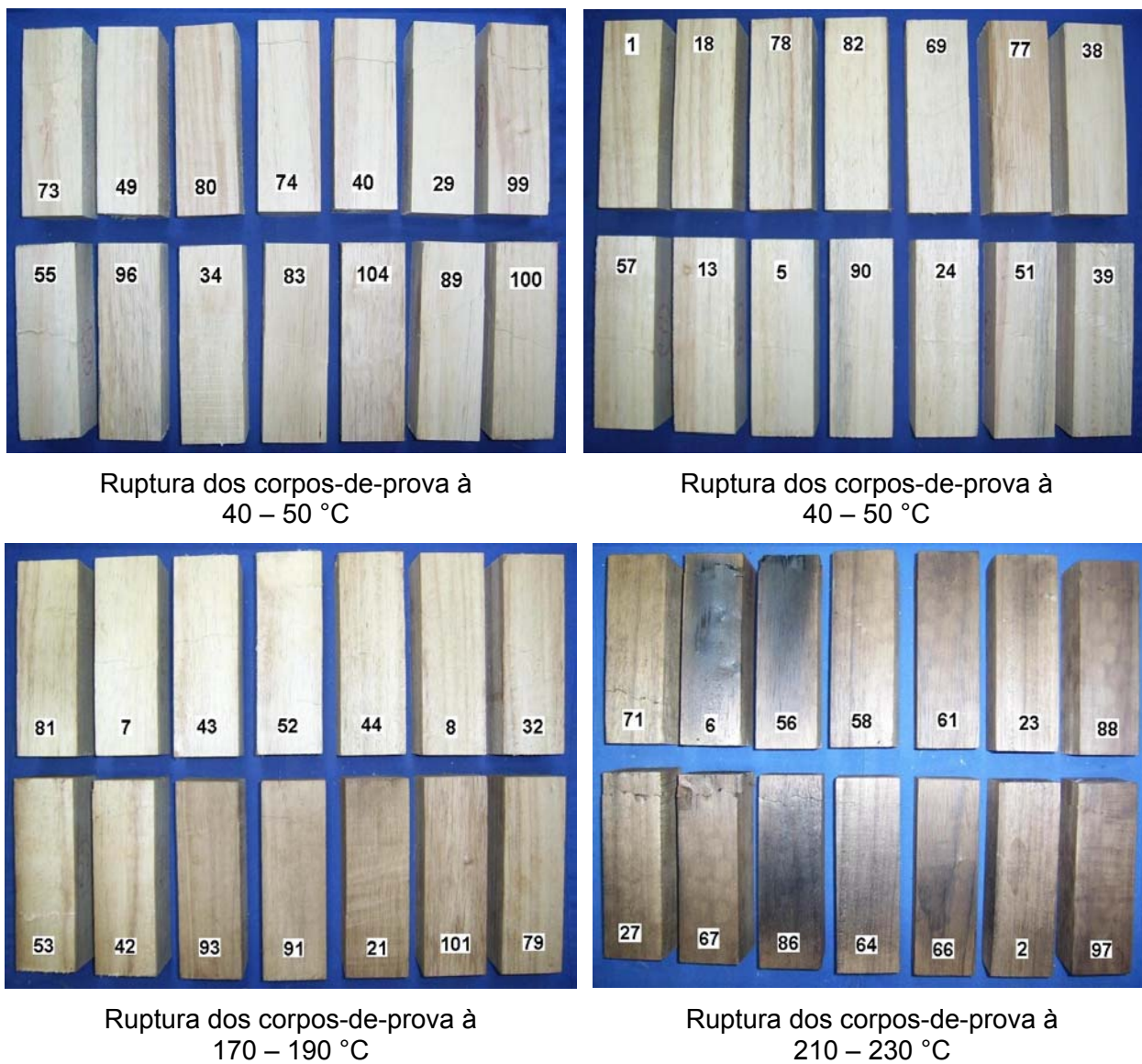
#### 4.1.3 Comportamento do ensaio à compressão.

Durante os ensaios, observou-se que a forma de ruptura dos corpos-de-prova varia com a temperatura de ensaio. Entre 20 e 110 °C a ruptura ocorre no centro do corpo-de-prova com um ângulo entre 55 e 65 ° (**Figura 43 a**). Na medida que a temperatura aumenta, até os 170 °C, a ruptura ocorre nos extremos do corpo-de-prova com um ângulo entre 45 e 55 ° (**Figura 43 b**). Finalmente, a 230 °C, a ruptura ocorre em topo do corpo-de-prova com um ângulo de 30° (**Figura 43 c**).



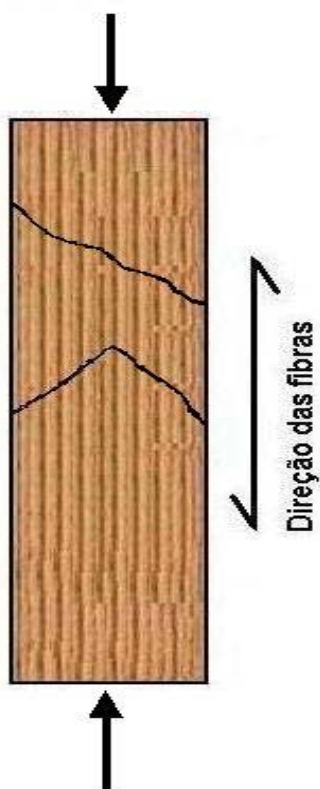
**Figura 43:** Ruptura dos corpos-de-prova em função da temperatura.

A ruptura dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela às fibras são apresentados na **Figura 44**.



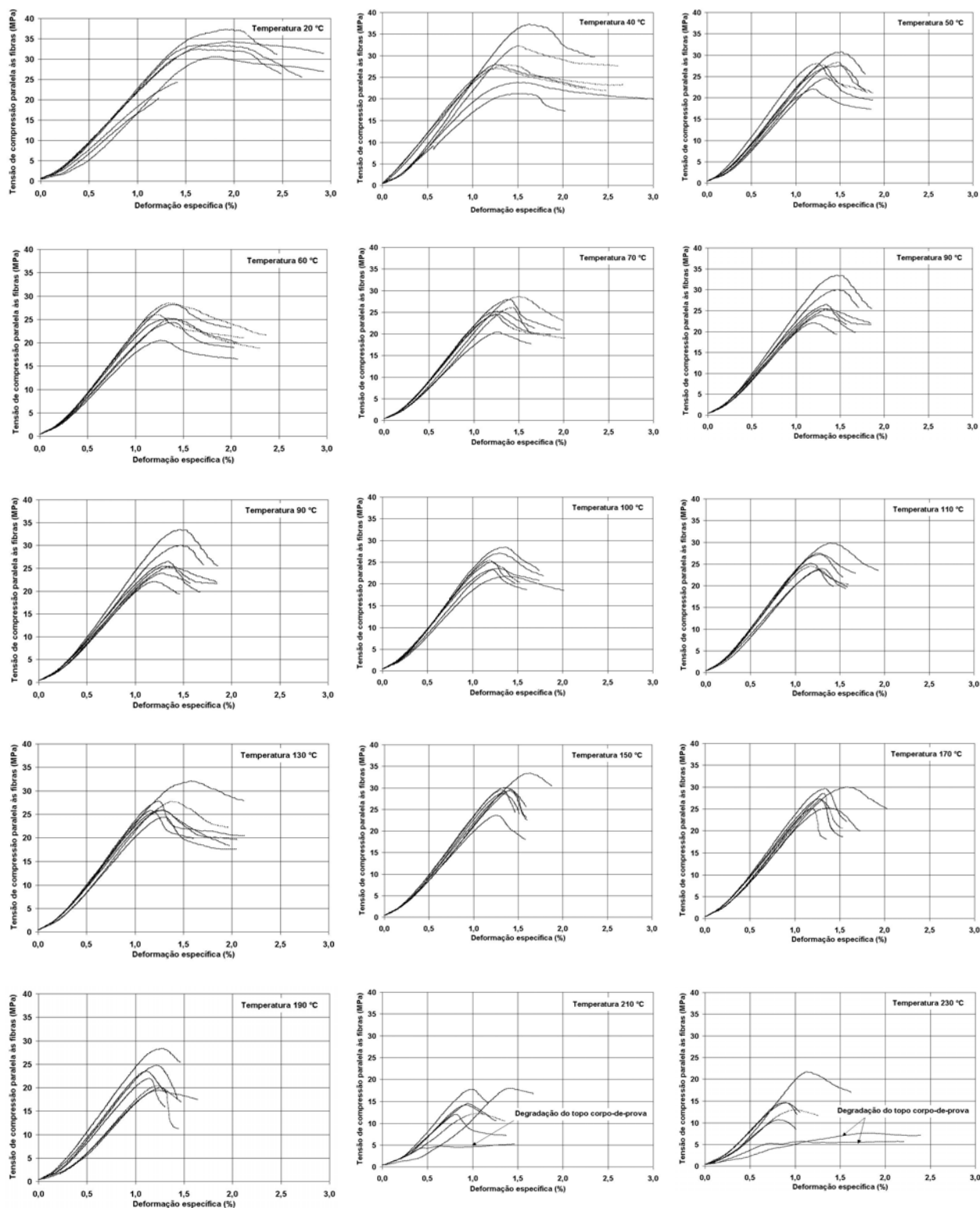
**Figura 44** : Ruptura dos corpos-de-prova.

Young e Clancy (2001) apresentam resultados similares aos obtidos neste trabalho, para corpos-de-prova de 90 x 90 x 300 mm da espécie *Pinus radiata* com um 12 % de umidade, ensaiados à temperatura entre 20–250 °C. A ruptura dos corpos-de-prova obtida por eles foi com um ângulo de 60 ° com relação à direção das fibras. Bodig (1982) afirma que as rupturas dos corpos-de-prova submetidos à compressão paralelas às fibras, são causadas pela forças cortantes em um ângulo à superfície carregada e associada com um plano mais fraco (**Figura 45**).



**Figura 45:** Ruptura por força cortante (BODIG, 1982).

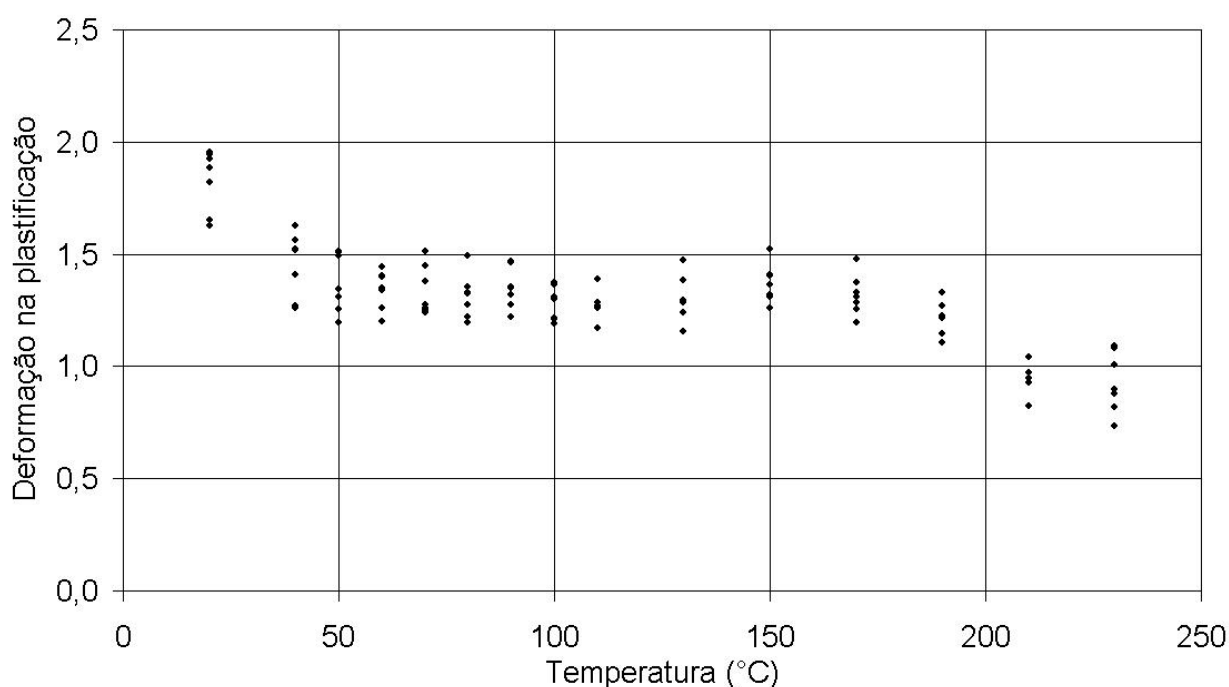
A **Figura 46** apresenta os gráficos de tensão x deformação específica obtidos no ensaio de compressão paralelo às fibras dos corpos-de-prova a diferentes níveis de temperatura. Observa-se que a tensão máxima diminui com aumento da temperatura, o mesmo acontece com a deformação.



**Figura 46:** Gráficos tensão de compressão paralela às fibras x deformação específica.

Na **Figura 47** são apresentados os resultados de deformação na plastificação dos corpos-de-prova. Foi realizada a análise de variância e constatou-se que existe diferença estatisticamente significativa com nível de confiabilidade de 95 % entre a

deformação à temperatura ambiente e as demais temperaturas. Observa-se que a deformação dos corpos-de-prova diminui com o aumento da temperatura até os 50 °C. Após a deformação específica permanece constante até 170 °C, o que pode ser percebido pelo patamar apresentado pela **Figura 47**. Acima de 170 °C inicia-se, novamente a redução da deformação, cabe ressaltar que os corpos-de-prova apresentavam 0 % de teor de umidade a partir desta temperatura (**Figura 41**).



**Figura 47:** Deformação na ruptura à compressão dos corpos-de-prova.

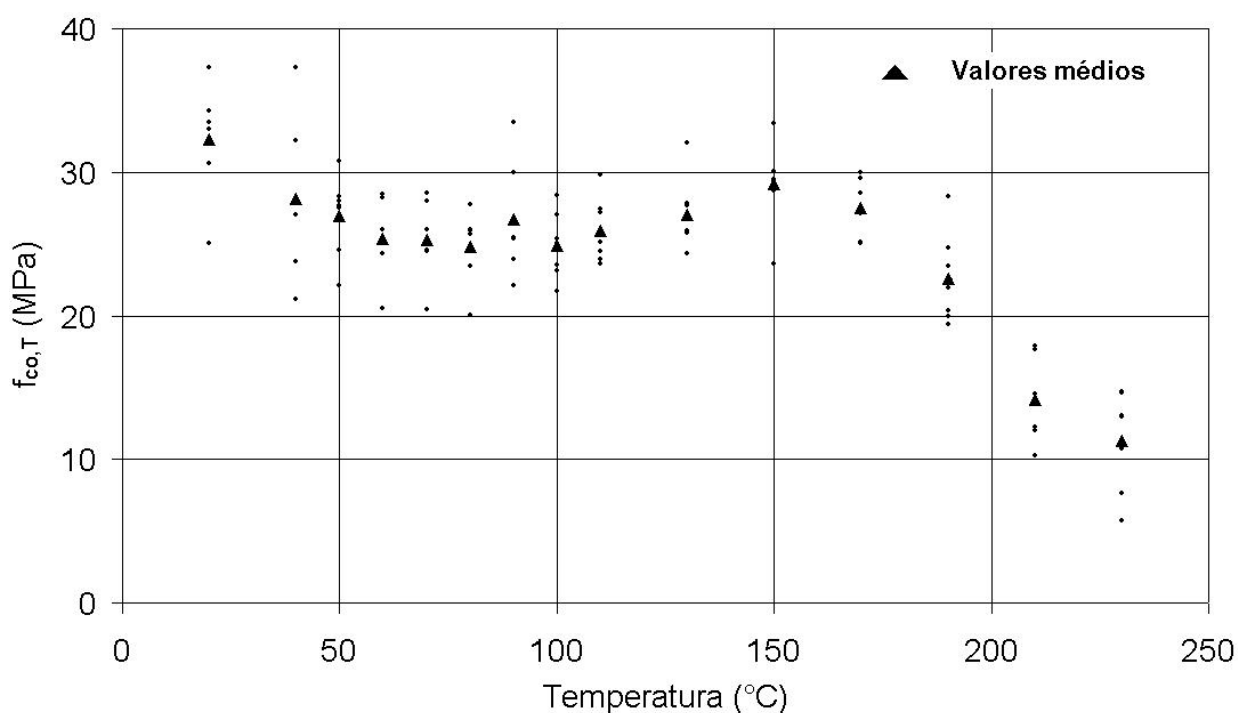
É fato conhecido que a transição vítrea da madeira esta vinculada à temperatura e teor de umidade da madeira. De acordo com ensaios realizados pela análise térmica diferencial em condições úmidas, Irvine (1984) indica que a transição vítrea da lignina de diversas espécies de madeira ocorre em um espectro de temperatura entre 60 - 90 °C, com um teor de umidade de 20 %. Para um conteúdo de umidade aproximado de 5 (%), a transição vítrea da lignina da espécie *Eucalyptus regnans* é perto de 70 °C. Para ensaios de madeira úmida, Olsson e Salmen (1997) encontraram que a transição vítrea para *Ulmus americana* ocorre em 78 °C e para o *Pinus strobus*, ele ocorrem em 90 °C. Cabe ressaltar que neste trabalho, a 70 °C, o paricá apresentou teor de umidade médio de 7,17 % (**Figura 41**).

A transição vítrea seca para os polímeros da madeira ocorre a altas temperaturas. Para a celulose ocorre entre 200 – 250 °C, hemicelulose ocorre em faixa de 150 – 220 °C e para lignina e superior a 205 °C (BACK e SALMÉN, 1982).

#### 4.1.4 Resistência à compressão paralela às fibras.

Os resultados de resistência à compressão paralela às fibras são apresentados na **Figura 48**. Os ensaios realizados à 20 °C apresentaram um valor médio da resistência à compressão paralela às fibras de 32,27 MPa e desvio padrão de 3,78 MPa. A análise de variância realizada indica que existe diferença estatisticamente significativa, com 95 % de confiança, entre os resultados de resistência à compressão paralelas às fibras à 20 °C e as demais temperaturas, com exceção do valor à 150 °C.

Com o aumento da temperatura o comportamento da resistência à compressão paralela às fibras diminui até um valor médio de 24,80 MPa a uma temperatura de 80 °C. Observa-se um pico relativo de 26,68 MPa a 90 °C, novamente a resistência baixa a um valor médio de 25,88 MPa e começa a subir até um valor médio de 29,17 MPa a 150 °C, onde os corpos-de-prova apresentavam um teor de umidade próximo a 0 %.



**Figura 48:** Resistência à compressão paralela às fibras.

Pode-se encontrar uma explicação para esta tendência da madeira no comportamento de seus polímeros. Irvine (1984) informa que para teores de umidade de 8 – 10 %, a lignina do *Eucalyptus regnans* apresenta transição vítrea entre 70 e 80 °C (**Figura 13**). Schaffer (1973), também informa que a partir de 55 °C a estrutura da lignina é alterada e a hemicelulose começa a amolecer (**Tabela 3**). Para ele, a resistência à compressão paralela às fibras depende fortemente da lignina exterior às fibras. Ocorre um amolecimento da lignina em torno de 100 °C e posterior endurecimento a temperaturas mais elevadas.

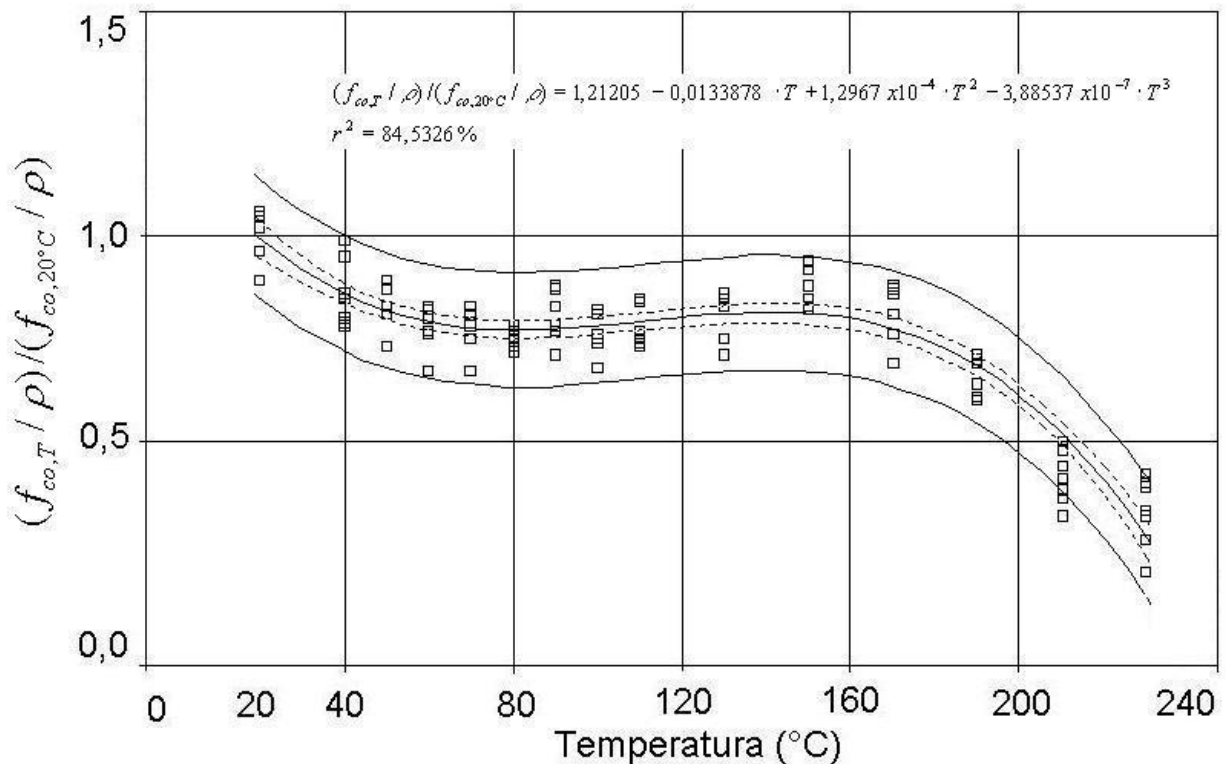
A redução acentuada da resistência à compressão paralela às fibras pode ser explicada pela transição vítrea dos polímeros da madeira seca (**Figura 13**) e (**Tabela 6**) e também pela degradação térmica deste (**Tabelas 4, 5 e 7**). Segundo Dinwoodie (1989), a temperatura de degradação da celulose ocorre a temperaturas superiores a 200 °C.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão paralela às fibras são apresentados na **Figura 49**, normalizados em relação à resistência à compressão média a 20 °C e divididos por suas respectivas massas específicas. A figura apresenta os intervalos de confiança para estimativa dos valores da resistência à compressão paralela às fibras com uma confiabilidade de um 95 %.

Encontrou-se para o ensaio de compressão paralelo às fibras (**Figura 49**), um coeficiente de correlação ( $r^2$ ) de 84,5326 % para a equação de regressão. Considerando que o coeficiente de correlação obtido é alto pode-se afirmar que existe uma relação significativa entre a resistência à compressão paralela às fibras e a temperatura de ensaio.

Observa-se na **Figura 49** uma dispersão menor dos valores entre as temperaturas de 20 e 100 °C e coeficiente de variação médio de 6,77 % . Encontrou-se para valores acima de 100 °C um coeficiente de variação médio de 8,46 %.

Os corpos-de-prova que foram submetidos a um ensaio de compressão paralela às fibras a temperaturas elevadas tiveram uma redução da resistência inicial de 35,07 %, para uma faixa de temperatura de 20 a 230 °C.

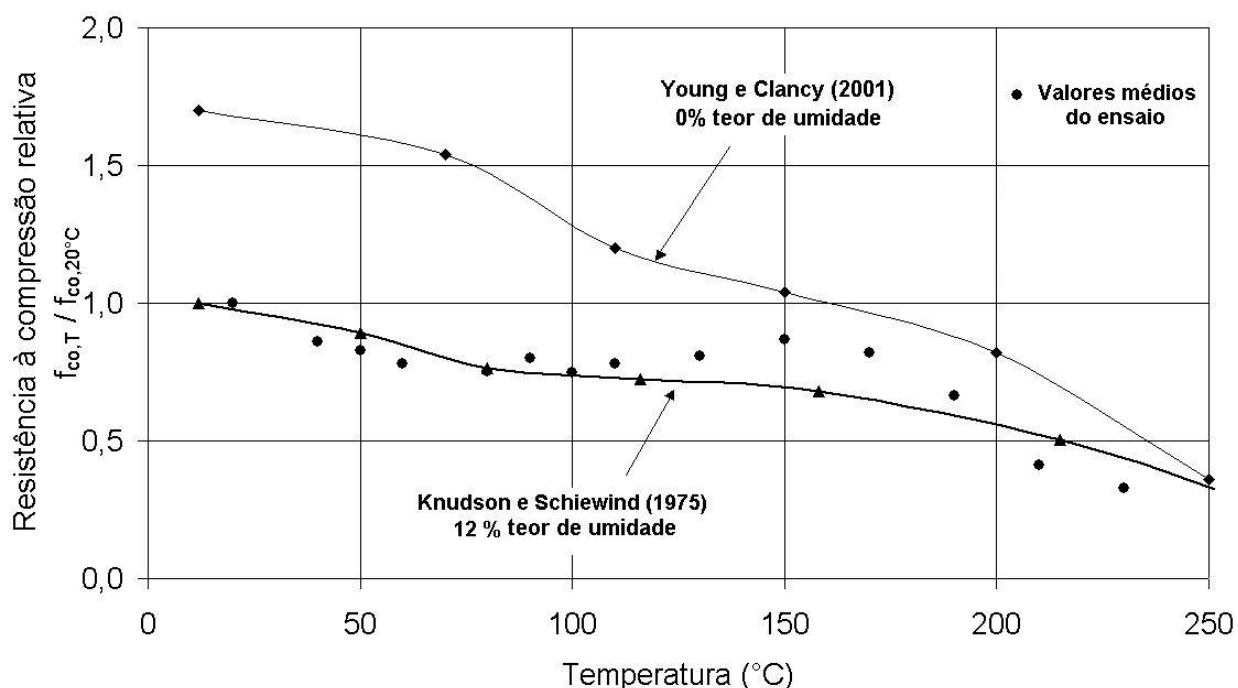


**Figura 49:** Intervalo de confiança da resistência à compressão paralela às fibras.

Na **Figura 50** são apresentados os resultados médios de resistência à compressão paralela às fibras normalizados em relação à temperatura ambiente e os obtidos por Knudson e Schniewind (1975) e por Young e Clancy (2001). Knudson e Schniewind, e Young e Clancy estudaram o comportamento da espécie *Pseudotsuga menziesii* e *Pinus radiata*, respectivamente. Os resultados obtidos por Knudson e Schiewind (1975), para a mostras com teor de umidade de 12 %, são similares ao comportamento obtido neste trabalho. As diferenças obtidas entre as temperaturas 110 e 190 °C pode estar associada ao modo como o corpo-de-prova foi aquecido. Os corpos-de-prova, neste trabalho, foram aquecidos de forma homogênea, o que garantiu que todas as suas partes estivessem à mesma temperatura (180 minutos), com teor de umidade entre 4 – 0 %. No ensaio realizado por Knudson e Schiewind (1975), os corpos-de-prova foram aquecidos de forma superficial e por tempo determinado (5 – 20 minutos), eles não indicam o teor de umidade a esse nível de temperatura.

Os resultados obtidos por Young e Clancy (2001) foram maiores, devidos a que os corpos-de-prova utilizados por eles tinham um teor de umidade 0 %, enquanto os corpos-de-prova utilizados nesta pesquisa tinham 11,65 % à temperatura ambiente.





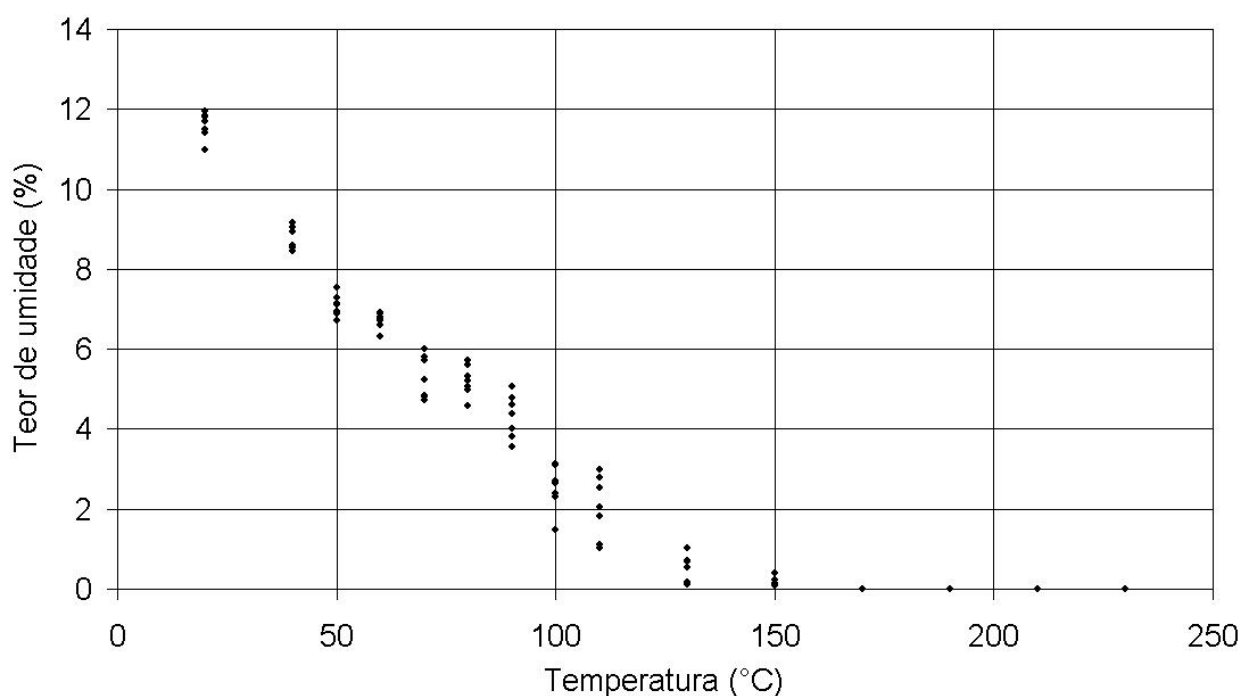
**Figura 50:** Comparação da resistência à compressão paralela às fibras com valores encontrados na literatura (KNUDSON e SCHIEWIND, 1975; YOUNG e CLANCY, 2001).

#### 4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS.

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios de resistência à tração paralela às fibras do paricá.

##### 4.2.1 Teor de umidade dos corpos-de-prova após do ensaio.

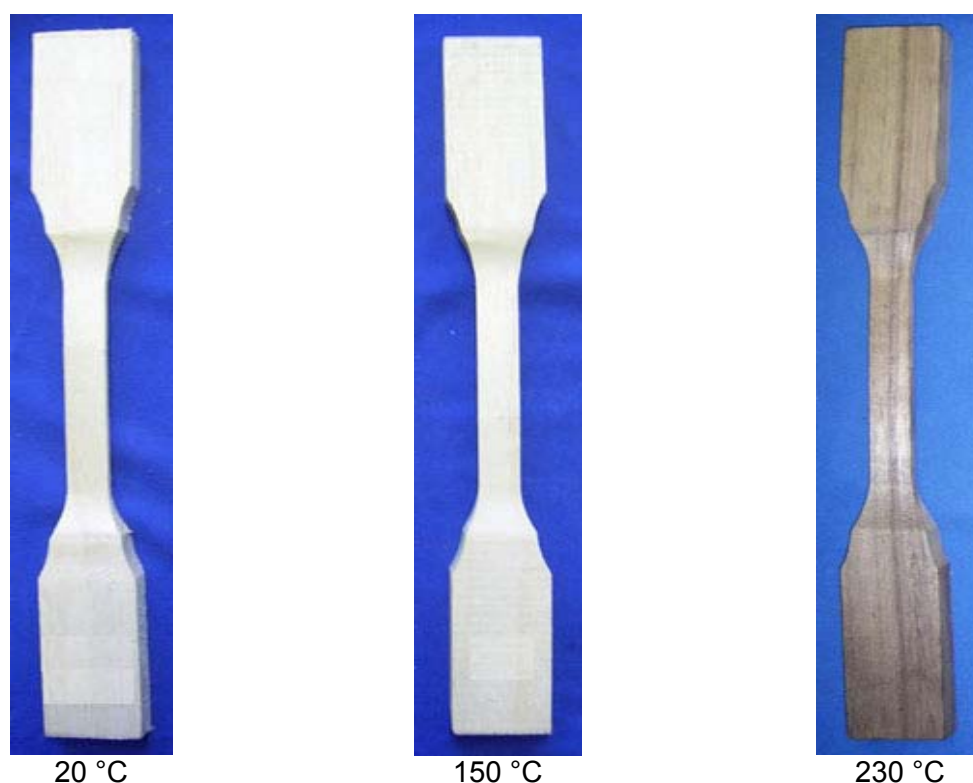
A **Figura 51** ilustra o teor de umidade dos corpos-de-prova após um período aquecimento de 120 minutos no forno e 4 minutos de ensaio mecânico. Observa-se que o teor de umidade diminui linearmente com o aumento temperatura do ensaio. Os corpos-de-prova expostos a um nível de temperatura de 150  $^{\circ}C$  apresentavam também 0 % de umidade.



**Figura 51:** Teor de umidade dos corpos-de-prova após do ensaio.

#### 4.2.2 Alteração da coloração dos corpos-de-prova.

Durante o aquecimento dos corpos-de-prova, entre 20 e 230 °C, ocorreram mudanças de cor na madeira. Estas alterações foram mais marcantes nos níveis mais elevados de temperatura, principalmente em temperaturas superiores a 150 °C, observa-se alteração da coloração dos corpos-de-prova na parte externa e interna da madeira (**Figura 52**).

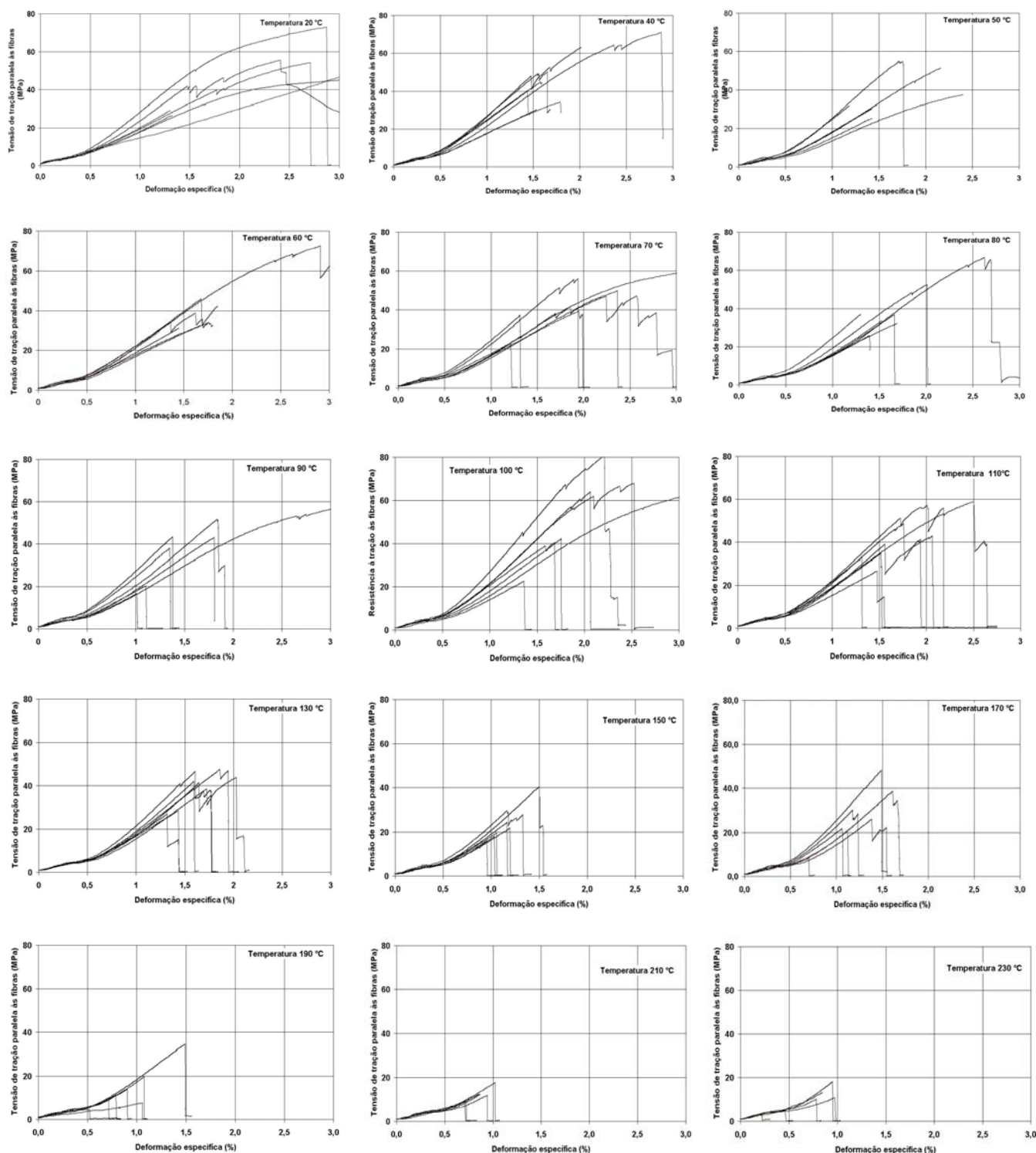


**Figura 52:** Variação da coloração dos corpos-de-prova em função da temperatura.

#### 4.2.3 Comportamento do ensaio à tração.

Durante os ensaios, observa-se que a deformação, no instante da ruptura dos corpos-de-prova, diminui com o aumento da temperatura. Abaixo de 100 °C, a deformação de ruptura tem um comportamento variável. Ocorre um pico a 70 °C, indicando que houve o aumento da ductilidade do material em relação a outros níveis de temperatura, onde o comportamento da madeira é mais frágil. Nesta temperatura, segundo Schaffer (1975) a lignina é alterada, hemicelulose começa a amolecer. Para esta temperatura o teor médio de umidade é de 5,31 %.

A **Figura 53** apresenta os gráficos de tensão x deformação específica obtidos no ensaio de tração paralela às fibras dos corpos-de-prova a diferentes níveis de temperatura.



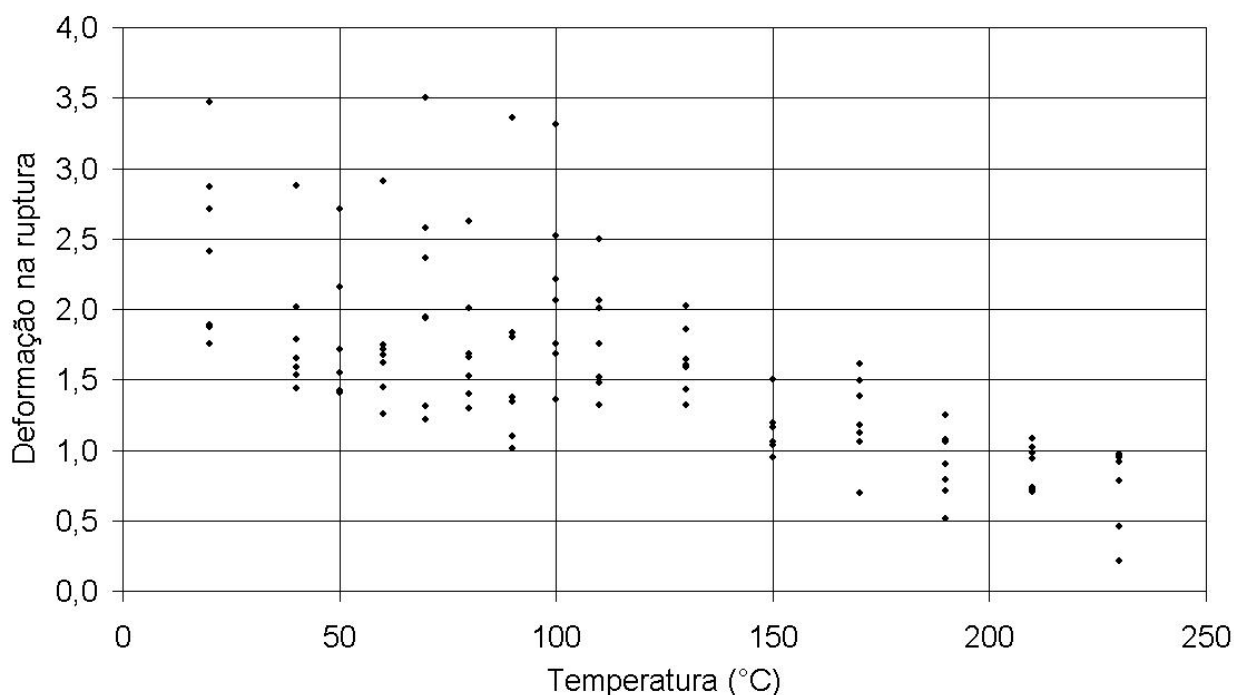
**Figura 53:** Gráficos tensão de tração paralela às fibras x deformações específicas.

A **Figura 54** ilustra o comportamento da deformação específica determinada a partir da Equação 3. Percebe-se grande dispersão dos dados, principalmente, nas faixas de temperaturas até 110 °C. A partir de 130 °C apresenta uma deformação linear

até os 230 °C. Este comportamento pode ser ilustrado pela alteração dos polímeros componentes da madeira, como já foi discutido nos resultados do ensaio de compressão paralela às fibras.

A 80 e 90 °C a deformação de ruptura média é de 71,90 e 69,83 % da deformação média à 20 °C. Enquanto à 100 °C, a deformação de ruptura média é de 88,01 % da deformação a temperatura ambiente. A 230 °C, a deformação é de 30,99 % menor que a temperatura de 20 °C (**Figura 54**).

Schaffer (1973) apresenta os resultados obtidos por vários autores. Observa-se que durante o aquecimento da madeira ocorrem os seguintes fenômenos: entre 50 – 60 °C a estrutura natural da lignina é alterada (GORMAG, 1963), as hemiceluloses começam a amaciar (Harkin, 1969). Observa-se que a 70 °C ocorre a transição vítrea da lignina de diversas espécies de madeira, (Irvine, 1984). A transição vítrea da hemicelulose é observada em uma extensão de 150 – 220 °C e para madeiras nativas em torno de 180 °C (Alfthan e Brown, (1973); Salmen, 1979). Segundo Back e Salmen (1982), para a celulose, a temperatura de transição vítrea situa-se entre 200 - 250 °C.



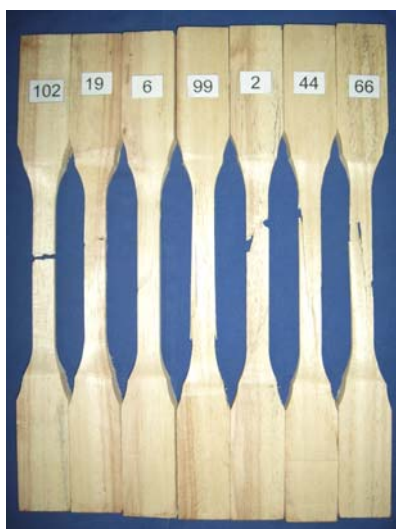
**Figura 54:** Deformação de ruptura à tração paralela às fibras dos corpos-de-prova.

Durante os ensaios, observou-se que os corpos-de-prova ensaiados entre a temperatura ambiente e 40 °C apresentaram secção transversal com ruptura fibrosa. A

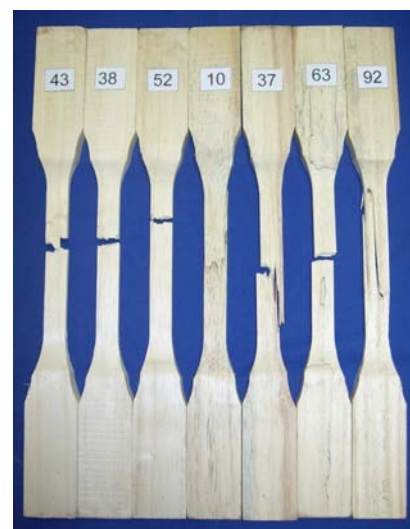
80 e 90 °C e acima de 190 °C, observou-se secções de ruptura retas, indicando uma fragilidade do material nestes níveis de temperatura, conforme ilustrado na **Figura 55**.



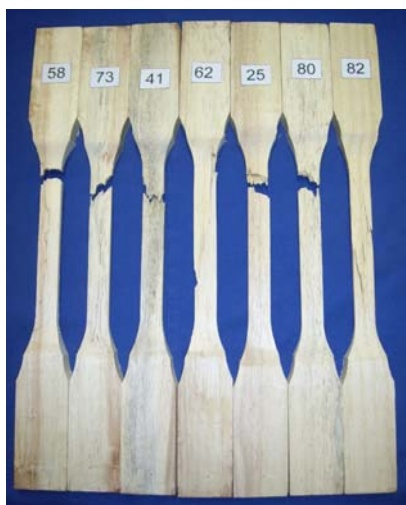
Ruptura dos corpos-de-prova a 20 °C



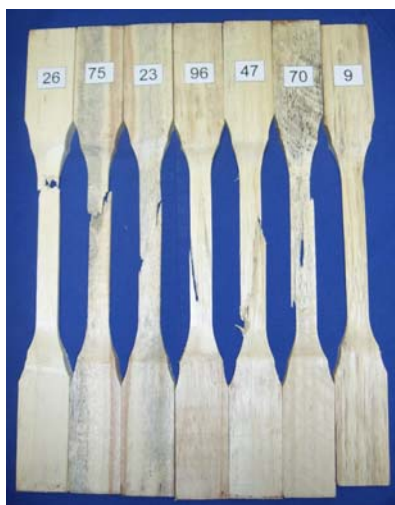
Ruptura dos corpos-de-prova a 70 °C



Ruptura dos corpos-de-prova a 80 °C



Ruptura dos corpos-de-prova a 90 °C



Ruptura dos corpos-de-prova a 100 °C



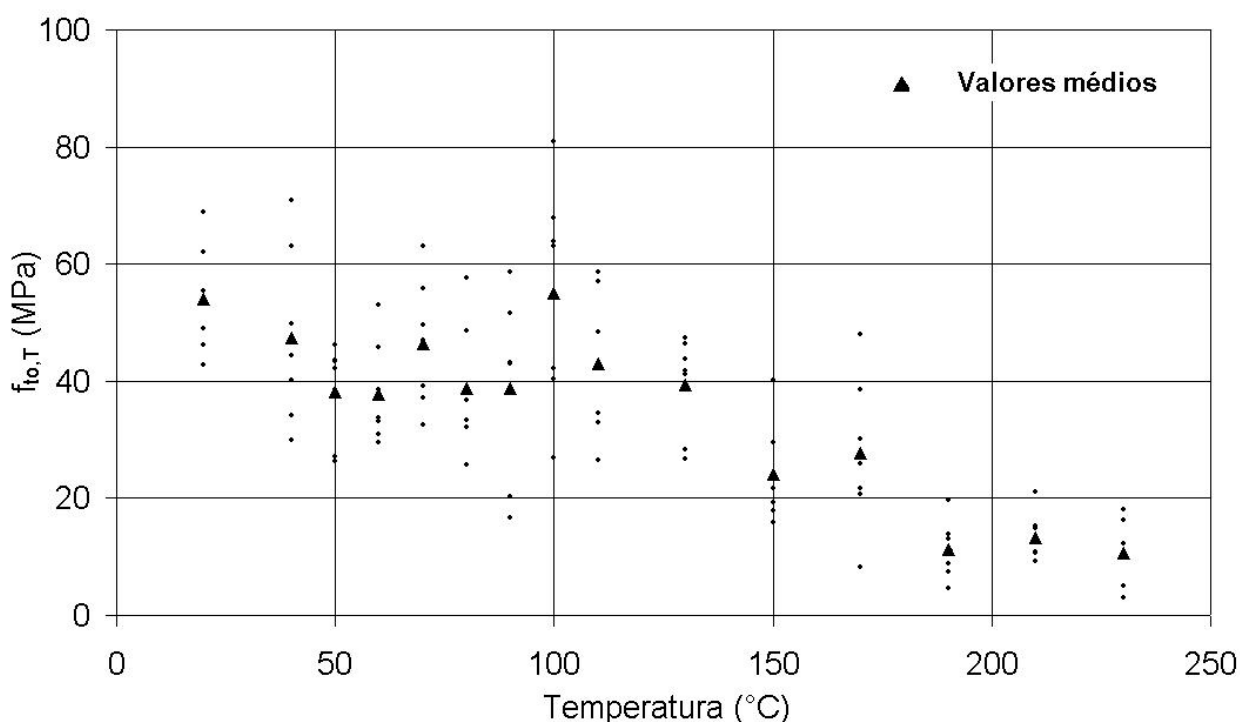
Ruptura dos corpos-de-prova a 230 °C

**Figura 55:** Ruptura dos corpos-de-prova.

Schaffer (1973) encontrou o mesmo comportamento de ruptura para corpos-de-prova de *pinus douglas* com densidade de 432 – 522 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade de 12 %. As dimensões dos corpos-de-prova utilizados por ele foram de seção 3,2 mm de espessura e 25,4 mm.

#### 4.2.4 Resistência à tração paralela às fibras.

Os resultados de resistência à tração paralela às fibras obtidos são apresentados na **Figura 56**. Os ensaios realizados à 20 °C apresentam valor médio da resistência à tração paralela às fibras de 54,02 MPa e desvio padrão de 9,11 MPa. A análise de variância realizada indica que existe diferença estatisticamente significativa, com 95 % de confiança, entre os resultados de resistência à tração paralela às fibras à 20 °C e as demais temperaturas com exceção daquelas a 40, 70 e 100 °C. Os resultados mostram que existe um perda de resistência de 80 % com o aumento da temperatura, porém esta perda não é contínua. Existe um aumento de resistência na faixa de 70 e 100 °C.

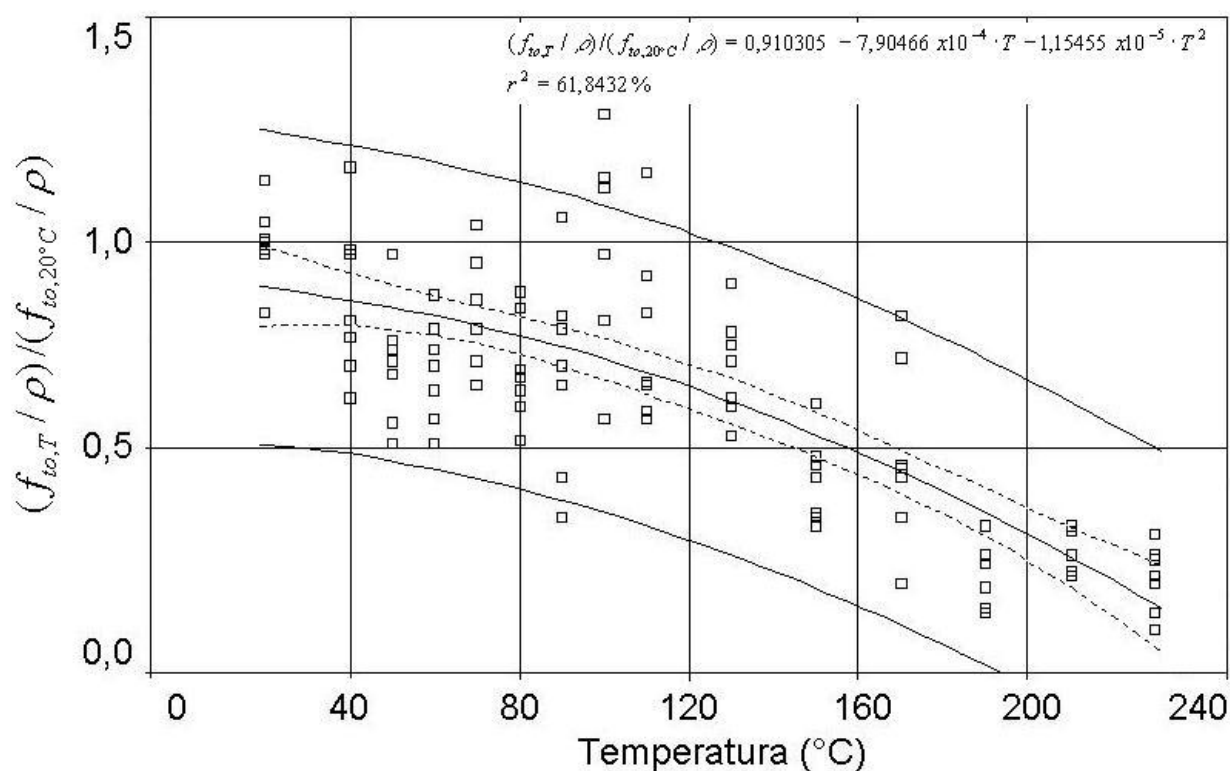


**Figura 56:** Resistência à tração paralela às fibras.

Observa-se que a 100 °C, os resultados mostram que a resistência é máxima com um valor médio de 55,00 MPa e desvio padrão de 18,94 MPa, e teor de umidade de 2,54 %. Acima de 100 °C, a resistência à tração paralela às fibras baixa rapidamente na medida que a temperatura aumenta, embora os corpos-de-prova tenham um teor de umidade menor.

Segundo Ifju (1964), a resistência à tração paralela às fibras depende fortemente da fração de celulose na madeira. Segundo Schaffer (1973), a resistência à tração e a rigidez da madeira têm como principal responsável às cordas da celulose dentro das fibrilas, as quais se degradam substancialmente em temperaturas acima de 200 °C.

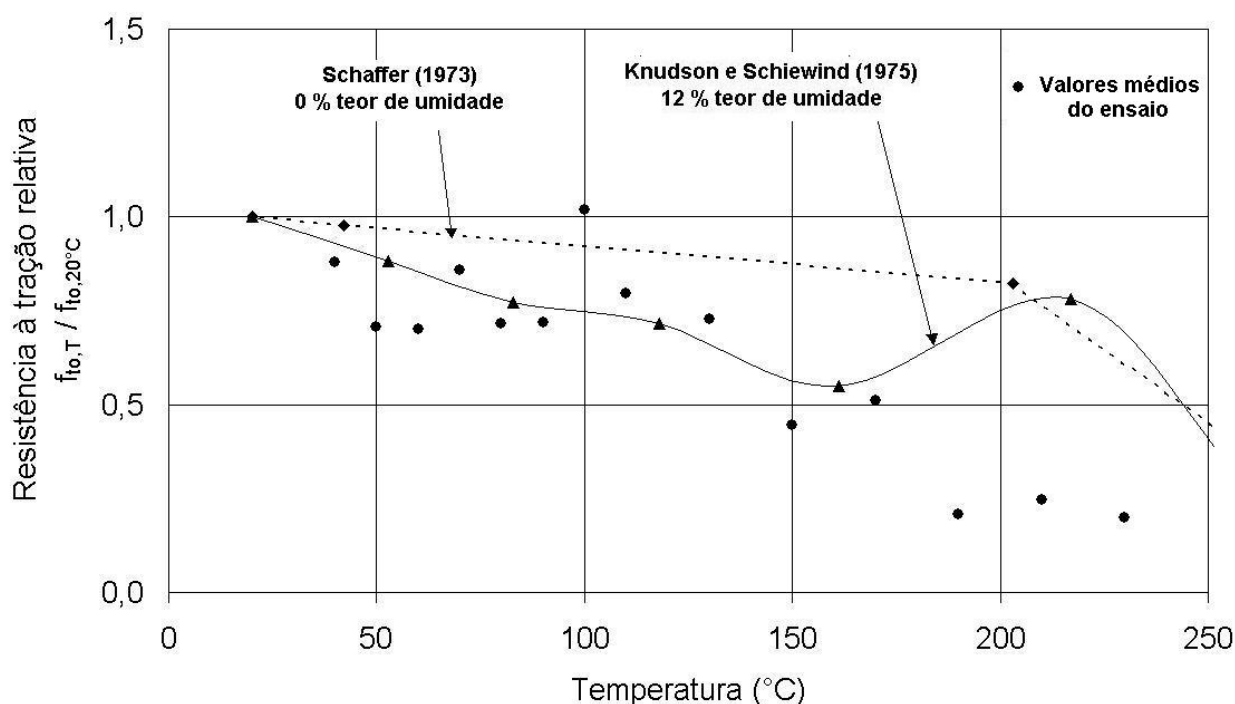
Na **Figura 57** são apresentados os resultados no ensaio de resistência à tração paralela às fibras. Eles são normalizados em relação à resistência à tração média à 20 °C e dividida por suas respectivas massas específicas. A **Figura 57** apresenta os intervalos de confiança para estimativa dos valores da resistência à tração paralela às fibras com uma confiabilidade de 95 %. Encontrou-se um coeficiente de correlação ( $r^2$ ) de 61,8432 % para a equação de regressão e um erro de estimação para a amostra de 0,186346. Considerando que o coeficiente de correlação obtido é médio pode-se afirmar que existe uma relação entre a resistência à tração paralela às fibras e a temperatura de ensaio. Observa-se uma dispersão maior dos valores entre as temperaturas de 20 e 100 °C manifestado em seu coeficiente de variação médio de 12,12 %. Encontrou-se para os valores acima de 100 °C com coeficiente de variação médio de 7,07 %.



**Figura 57:** Resistência à tração paralela às fibras relativos.



Na **Figura 58**, são apresentados os resultados de Schaffer (1973) e Knudson e Schniewind (1975). Observa-se que os resultados obtidos por Knudson e Schniewind (1975) estão próximos daqueles obtidos nesta pesquisa, embora a espécie estudada por eles apresentava características físicas diferentes do paricá. Eles estudaram o comportamento da espécie *Pseudotsuga menziesii* com densidade de 420 – 570 kg/m<sup>3</sup>, e teor de umidade de 0 e 12 %. As secções transversais dos corpos-de-prova eram de 3/16 polegadas, de acordo norma ASTM.



**Figura 58:** Resistência à tração paralela às fibras normalizada.

#### 4.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.

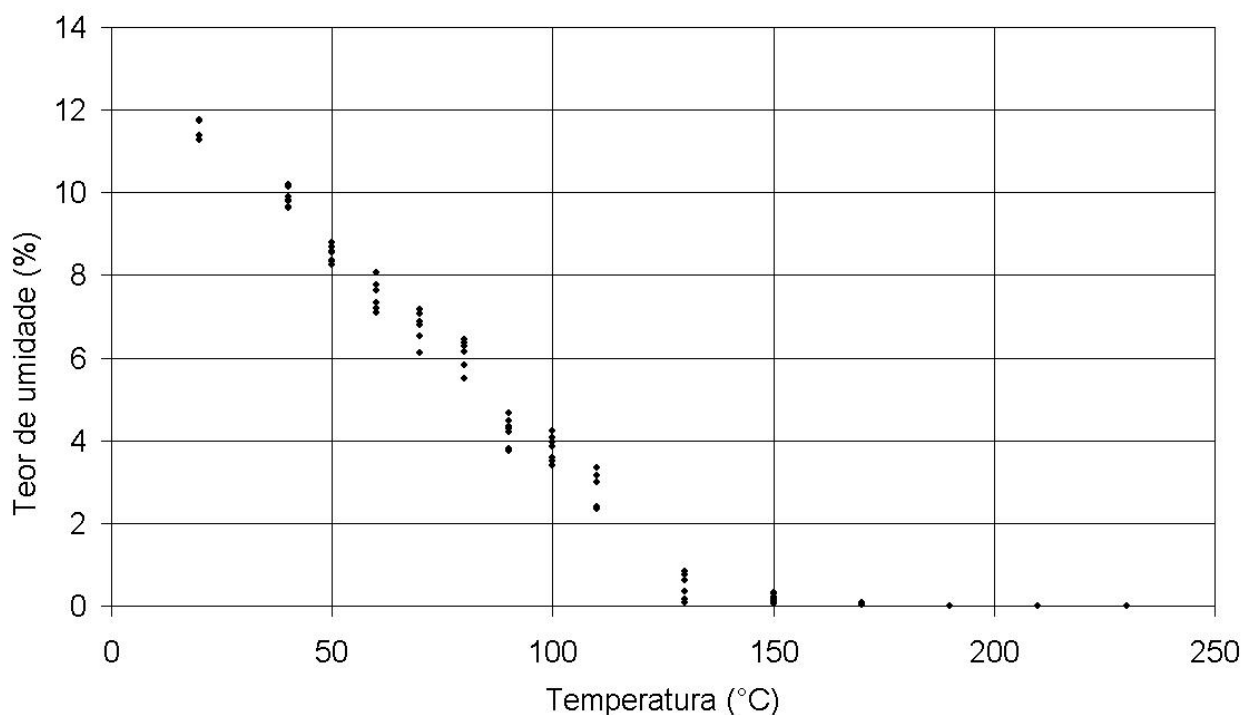
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras a fim de determinar a influência da temperatura sobre a resistência ao cisalhamento.

##### 4.3.1 Teor de umidade dos corpos-de-prova após de ensaio.

A **Figura 59** ilustra o teor de umidade dos corpos-de-prova após um período de aquecimento de 150 minutos no forno e 4 minutos de ensaio mecânico. Observa-se que o teor de umidade diminui linearmente com o aumento temperatura do ensaio. Os

corpos-de-prova expostos a um nível de temperatura de 150 °C também apresentavam 0 % de umidade. Neste nível de temperatura a madeira começa a perder água de constituição.

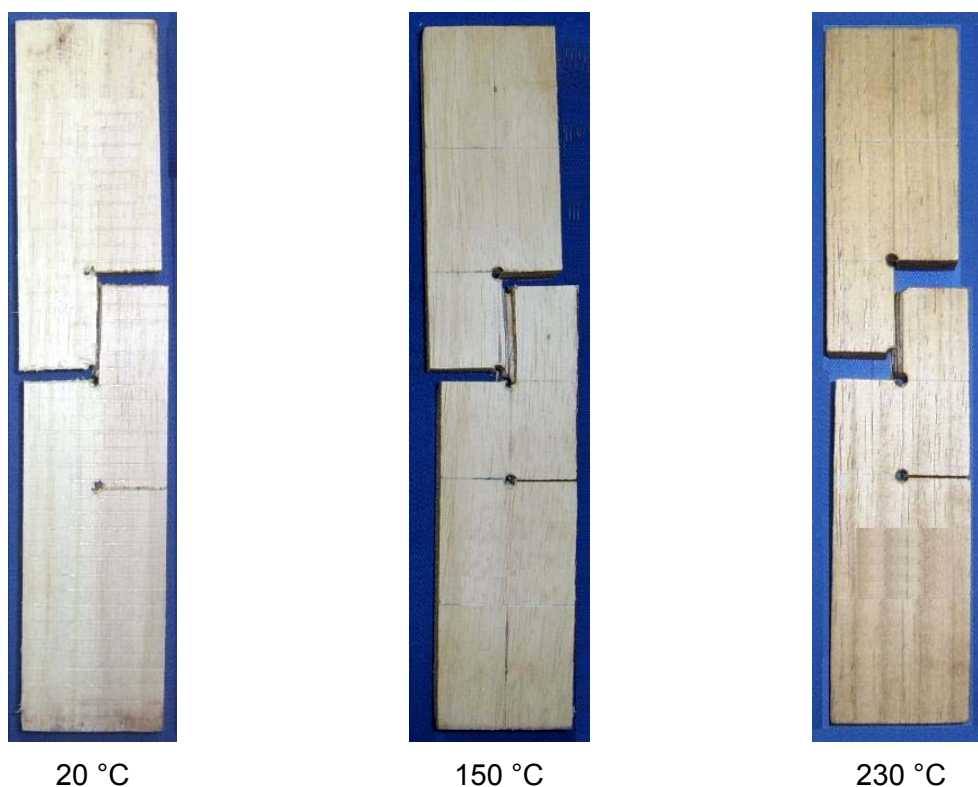
O índice de teor conteúdo de umidade pode ter uma influência grande nas propriedades da madeira submetidas a temperaturas elevadas, além de interferir na taxa de aquecimento.



**Figura 59:** Teor de umidade dos corpos-de-prova após do ensaio.

#### 4.3.2 Alteração da coloração dos corpos-de-prova.

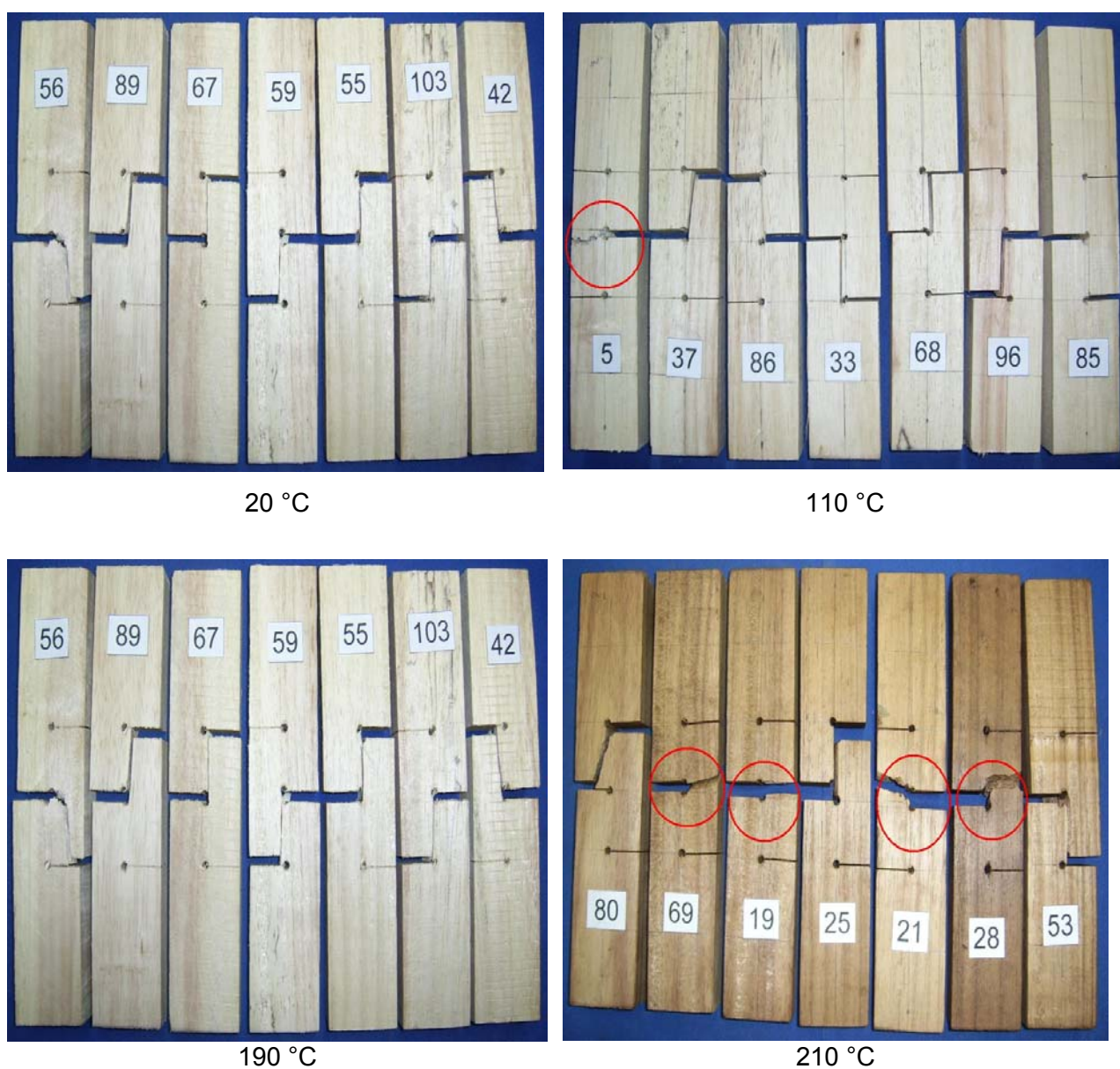
Durante o aquecimento dos corpos-de-prova, entre 20 e 230 °C, também foram verificadas mudanças de cor na madeira na parte externa e interna. Estas alterações foram mais marcantes nos níveis mais elevados de temperatura, principalmente em temperaturas superiores a 150 °C (**Figura 60**).



**Figura 60:** Variação da coloração dos corpos-de-prova em função da temperatura.

#### 4.3.3 Ruptura dos corpos-de-prova.

Nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, observaram-se dois tipos de ruptura: uma no plano de cisalhamento paralelo às fibras e outra por tração paralela às fibras. Entre 20 e 100 °C, a ruptura ocorre por cisalhamento. A 110, 150 e 170 °C ocorre ruptura por tração paralela às fibras nas faixas de temperatura citadas. O fenômeno apresenta-se novamente nas temperaturas 190 – 210 e 230 °C, ( com 2, 4, 1 corpo-de-prova por faixa, respectivamente), (**Figura 61**). Constata-se com isso, que a temperaturas mais elevadas (acima de 200 °C), a resistência à tração paralela às fibras pode ser menor que a resistência ao cisalhamento.



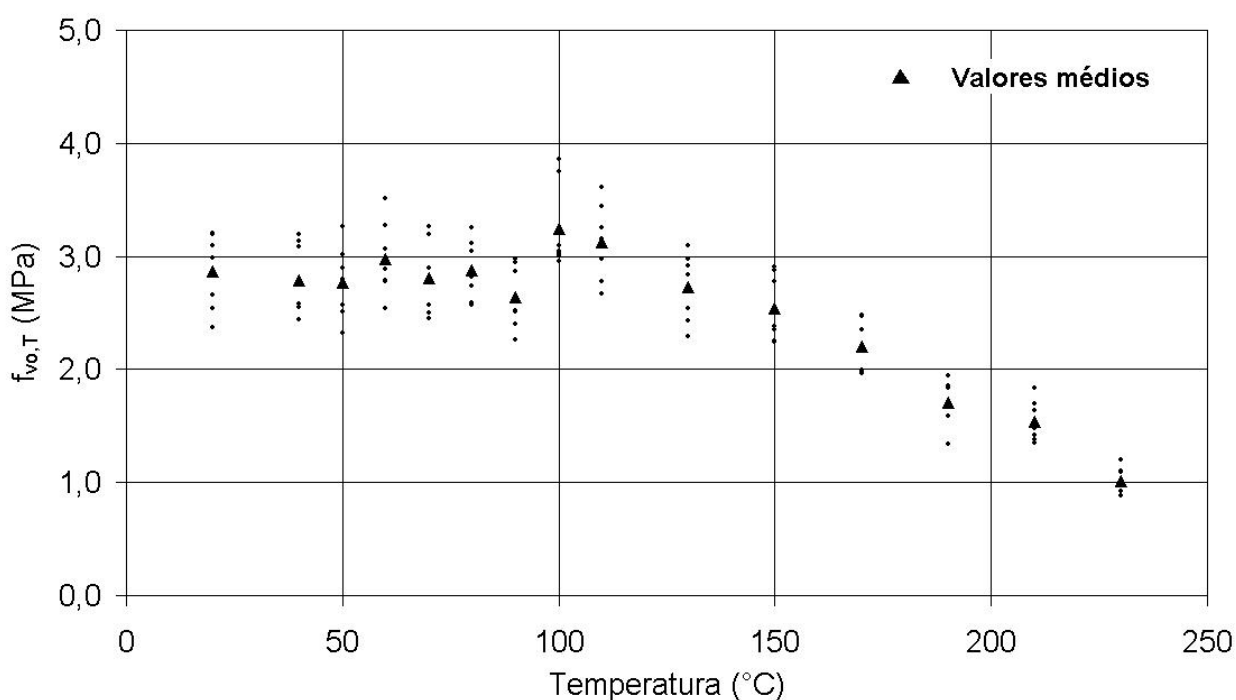
**Figura 61:** Ruptura dos corpos-de-prova.

O aumento da temperatura no interior da madeira força a reorganização da estrutura de seus componentes químicos (celulose, hemicelulose e lignina), momento no qual a madeira começa a mudar sua resistência mecânica. Segundo Ifju (1964), para a resistência ao cisalhamento, o componente da madeira que suporta a carga aplicada paralela às fibras é a lignina, que funciona como uma substância adesiva entre as cadeias de celulose.

#### 4.3.4 Resistência ao cisalhamento.

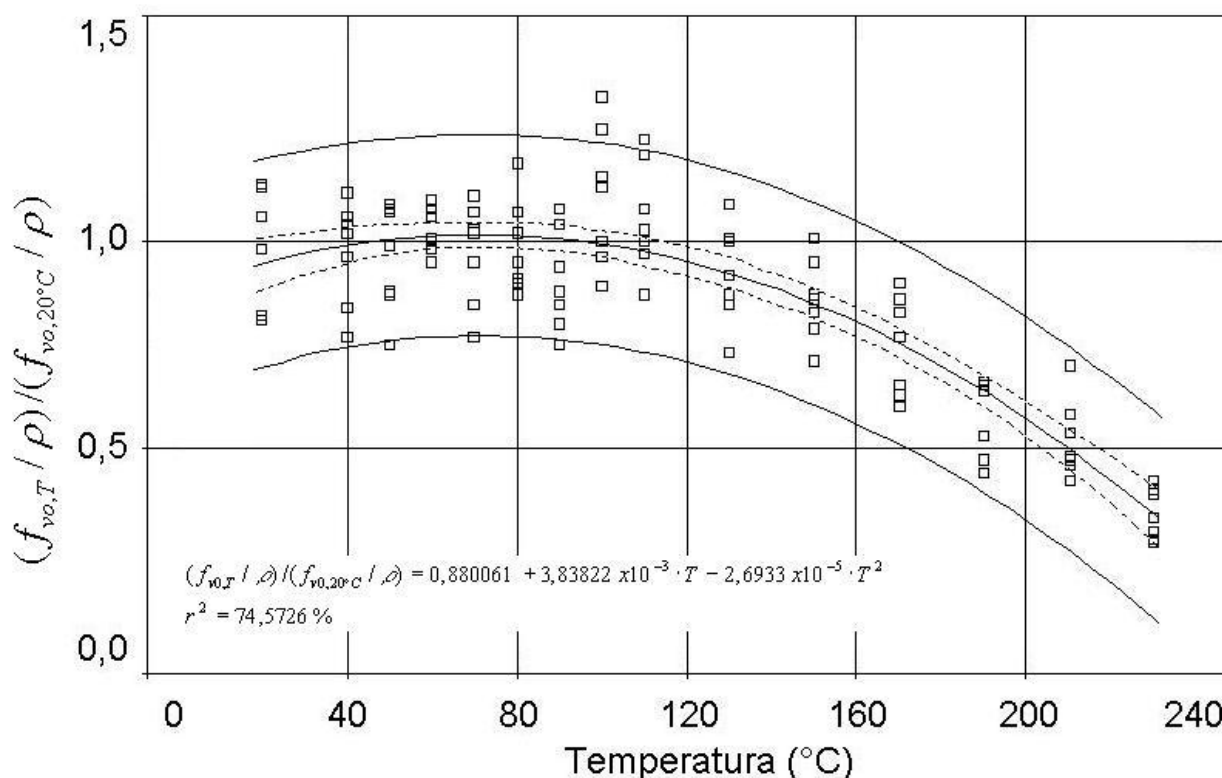
Os corpos-de-prova ensaiados à temperatura ambiente obtiveram um valor médio de resistência ao cisalhamento de 2,86 MPa e desvio padrão de 0,34 MPa, existe um perda de resistência de 65 % até os 230 °C. Com o aumento da temperatura, o comportamento da resistência ao cisalhamento é quase linear até os 90 °C. Observa-se que, a 100 °C, os resultados mostram que a resistência é máxima com um valor médio de 3,25 MPa e teor de umidade de 3,80 %. Acima de 100 °C, a resistência ao cisalhamento baixa rapidamente à medida que a temperatura aumenta, embora os corpos-de-prova ainda tenham baixo teor de umidade em sua estrutura. Os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de cisalhamento tiveram uma redução de 35,31 % da resistência inicial para uma faixa de temperatura de 20 a 230 °C (**Figura 62**).

Verificou-se através da análise de variância, com 95 % de confiança, que não existe diferença estatisticamente significativa entre a resistência ao cisalhamento à temperatura ambiente e as temperaturas de 40, 50, 70, 90 e 130 °C. Os resultados mostram que existe uma perda de resistência com o aumento da temperatura, porém esta perda não é contínua. Existe uma redução da resistência à 90 °C. A análise também mostra que existe diferença significativa entre a resistência ao cisalhamento para os outros níveis de temperatura.



**Figura 62:** Resistência ao cisalhamento.

Na **Figura 63**, são apresentados os resultados do ensaio de cisalhamento divididos pela respectiva massa específica, normalizados pelo valor à 20 °C, e os intervalos de confiança para estimativa dos valores da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com uma confiabilidade de 95 %.

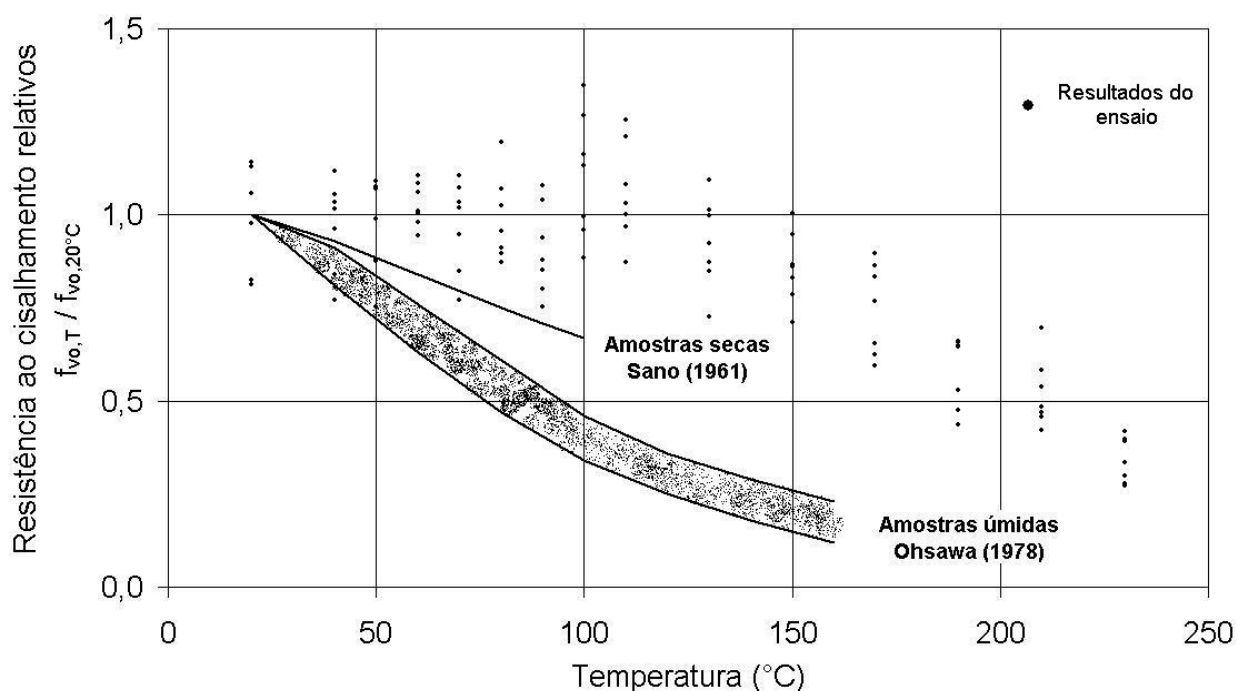


**Figura 63:** Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Na **Figura 64** são apresentados os resultados de resistência ao cisalhamento normalizado em relação à temperatura ambiente comparados aos obtidos por Ohsawa e Yoneda (1978) e por Sano (1961) apresentados por Gerhards (1982).

Os resultados obtidos nesta pesquisa diferem consideravelmente daqueles obtidos na literatura. Provavelmente esta diferença esteja relacionada com a metodologia de ensaio e a geometria dos corpos-de-prova utilizados. Neste trabalho utilizou-se o corpo-de-prova proposto por Szücs et al. (1998), enquanto que os autores citados utilizaram corpos-de-prova segundo a norma ASTM.

A tendência dos resultados oriundos de amostras secas, apresentados por Sano (1961), entre 20 e 100 °C é similar à tendência dos resultados obtidos neste trabalho entre 150 e 230 °C, quando as amostras estavam com um 0 % de teor de umidade.



**Figura 64:** Resistência ao cisalhamento normalizada.

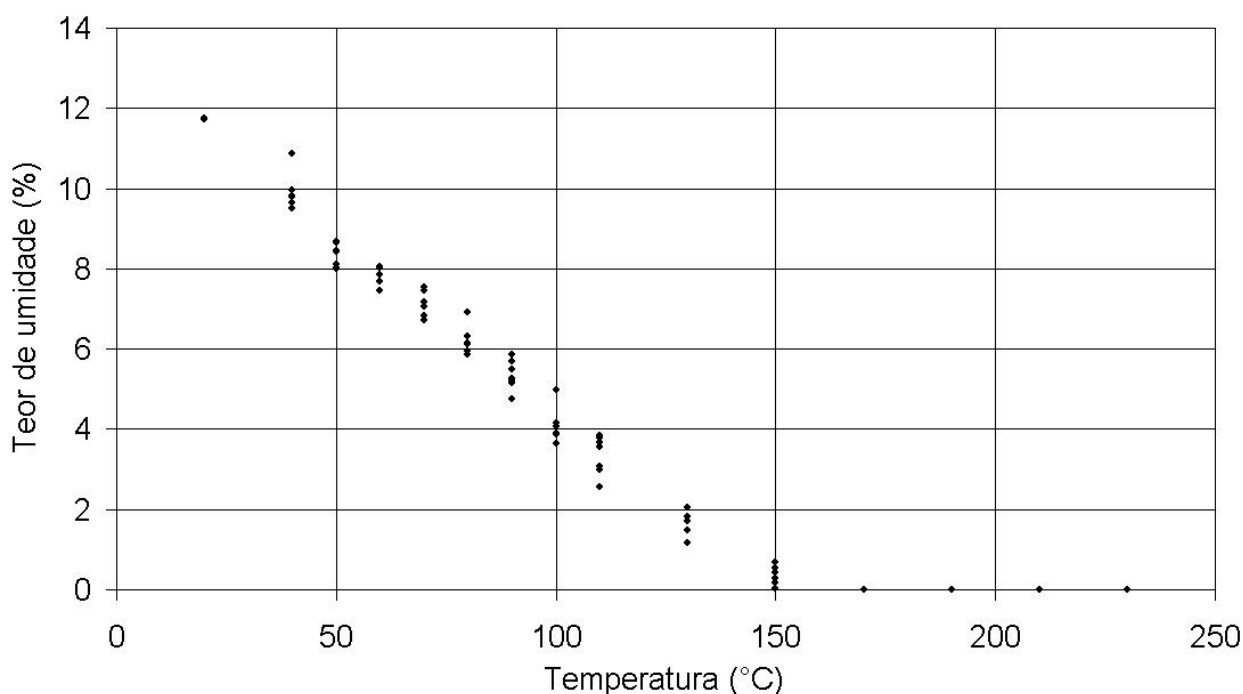
As reduções permanentes na resistência ao cisalhamento ocorrem a temperaturas maiores que 65 °C, dependendo da temperatura e índice de umidade. A redução da resistência ocorre provavelmente devido às reações de despolimerização sem perda significativa do peso de hidrato de carbono. A ruptura das ligações químicas começa a ocorrer a temperaturas maiores que 100 °C e são manifestadas como perdas do peso de hidrato de carbono, perdas de água de adesão, perdas de peso e amolecimento da lignina (BRYDEN, 1998; MILLER e BELLAN, 1996; SHAFIZADEH, 1984; ATREYA, 1983; BROWNE, 1958).

#### 4.4 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS.

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de embutimento quanto ao teor de umidade, alteração da coloração dos corpos-de-prova, comportamento do ensaio, resistência ao embutimento.

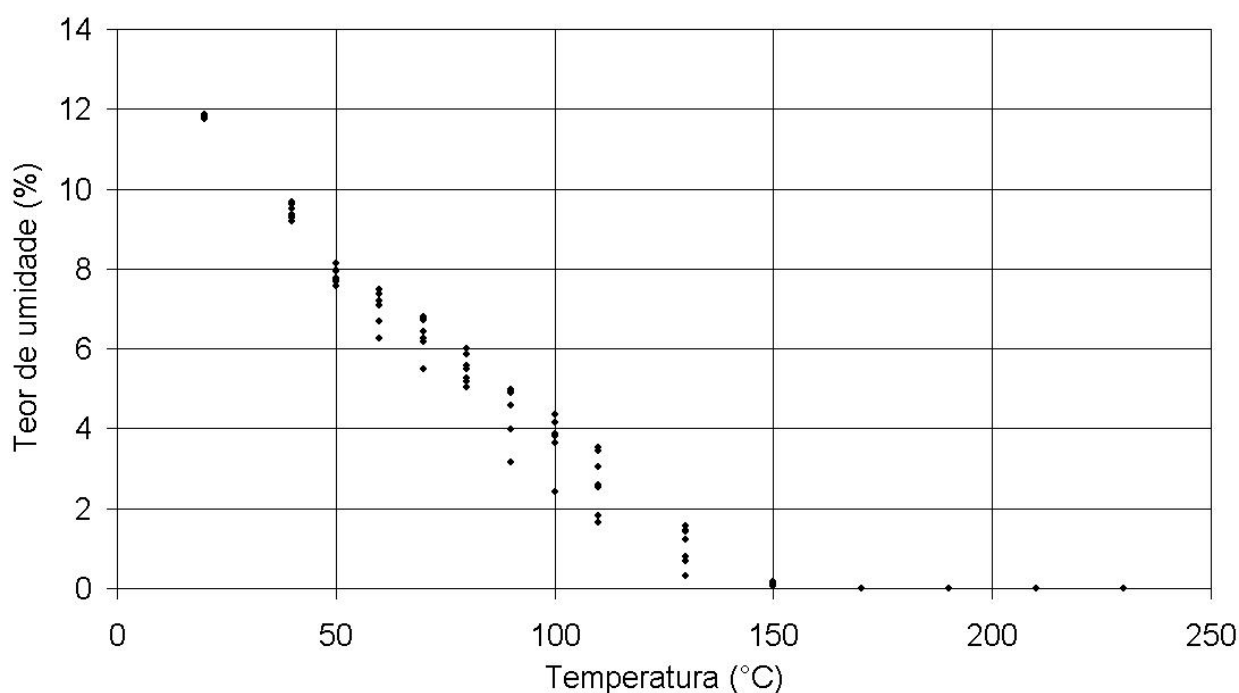
##### 4.4.1 Teor de umidade dos corpos-de-prova após ensaio.

As **Figura 65** e **Figura 66** ilustram o teor de umidade dos corpos-de-prova após um período de aquecimento de 120 minutos no forno e 10 minutos de ensaio mecânico. Observa-se que o teor de umidade para os ensaios de embutimento paralelo às fibras e perpendicular às fibras, diminui linearmente com o aumento temperatura do ensaio. Observa-se que na medida que os corpos-de-prova alcançam o nível de temperatura de 150 °C, eles apresentavam um teor de umidade de 0 %. Segundo Kollmann (1968), a 130 °C, a madeira começa a perder água de constituição, a retração é significativa e a degradação da mesma é iminente.



**Figura 65:** Teor de umidade dos corpos-de-prova de embutimento paralelo às fibras.

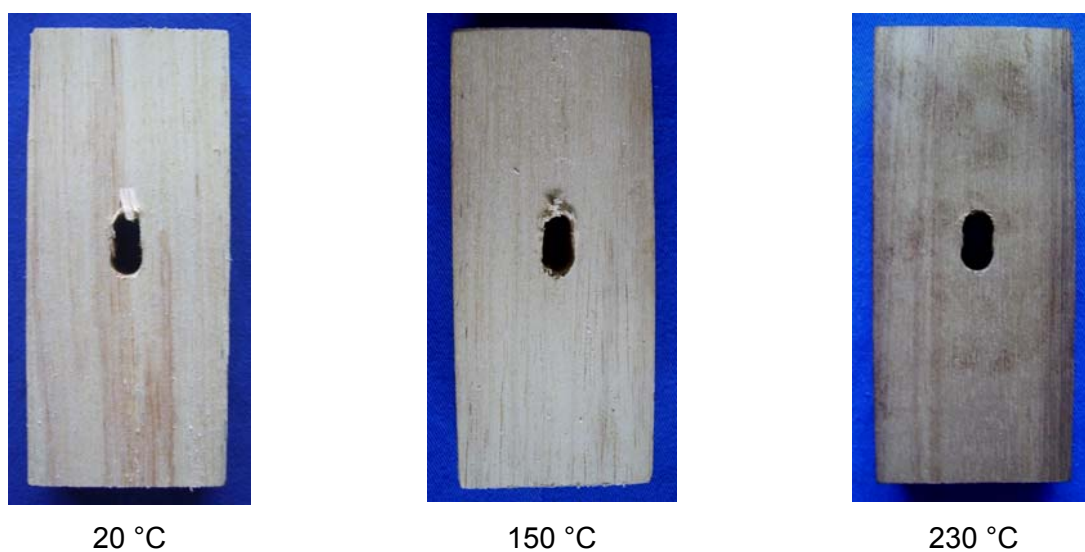




**Figura 66:** Teor de umidade dos corpos-de-prova de embutimento perpendicular às fibras.

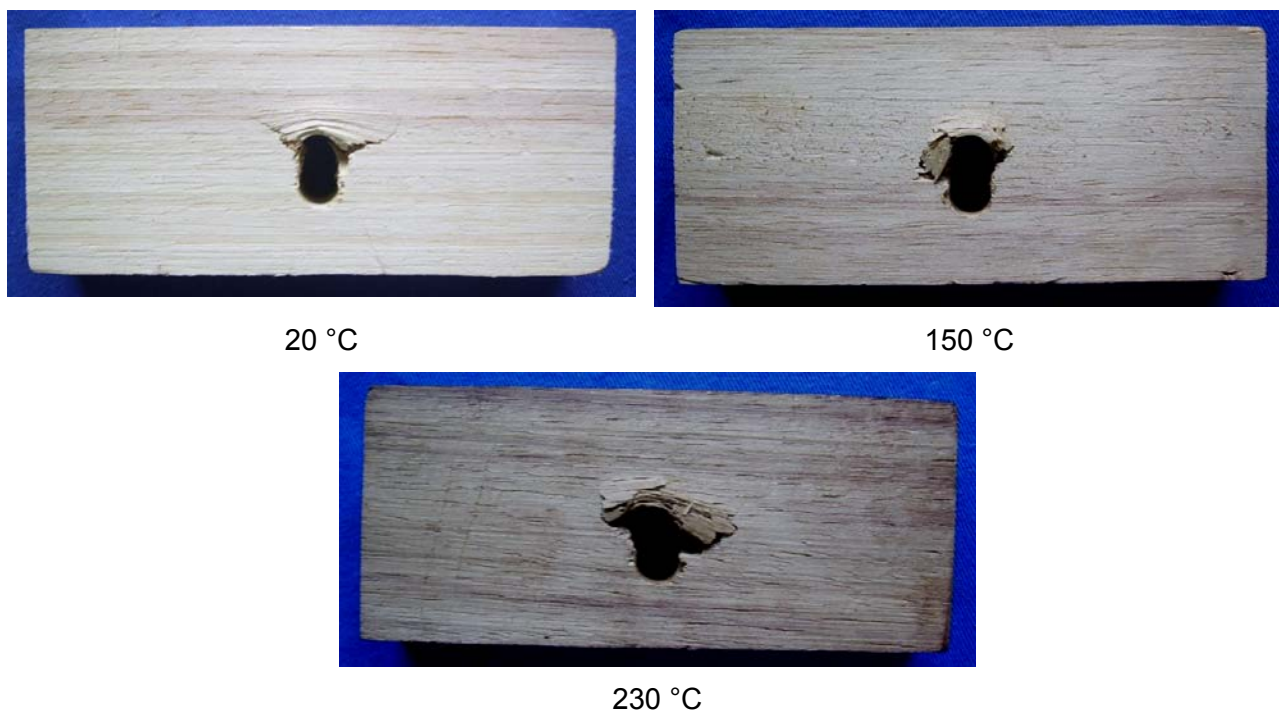
#### 4.4.2 Alteração da coloração dos corpos-de-prova.

As **Figura 67** e **Figura 68** ilustram a alteração da coloração dos corpos-de-prova ocorrida durante o aquecimento efetuado para a realização dos ensaios mecânicos entre 20 e 230 °C. Observa-se que ocorreram mudanças significativas de coloração da madeira, indicando o início da degradação dos seus polímeros. A alteração da coloração dos corpos-de-prova ocorre tanto na parte externa como interna dos corpos-de-prova.



**Figura 67:** Coloração dos corpos-de-prova de embutimento paralelo às fibras.

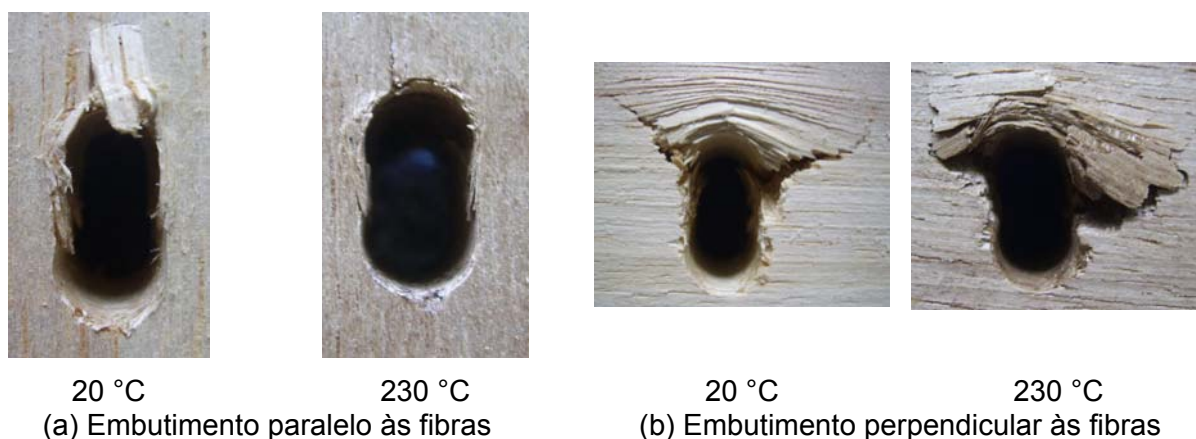
Elas foram mais marcantes nos níveis mais elevados de temperatura, principalmente em temperaturas superiores à 150 °C. À 230 °C, os corpos-de-prova apresentavam uma coloração mais escura.



**Figura 68:** Coloração dos corpos-de-prova de embutimento perpendicular às fibras.

#### 4.4.3 Ruptura dos corpos-de-prova no ensaio ao embutimento.

A **Figura 69** a e b mostram as rupturas que ocorreram nos corpos-de-prova durante os ensaios de embutimento da madeira. Os ensaios de embutimento paralelo às fibras apresentaram comportamento diferente daqueles de embutimento perpendicular às fibras. A ruptura dos corpos-de-prova de embutimento paralelos às fibras, para todas as faixas de temperatura, foram semelhantes aos ilustrados na **Figura 69** a. Na zona de contacto entre a madeira com o pino metálico, produz-se um esmagamento das fibras aderentes ao parafuso com uma posterior rupturas das mesmas. Na grande maioria dos ensaios, o final deles foi caracterizado pelo deslocamento de 10 mm da travessa da máquina de ensaio, permitindo a penetração do parafuso na madeira, o que indica um comportamento plástico acentuado do paricá. Este comportamento é considerado positivo no comportamento de ligações, pois mostram a capacidade da madeira de absorver deformações sem se romper.



**Figura 69:** Ruptura dos corpos-de-prova em ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras.

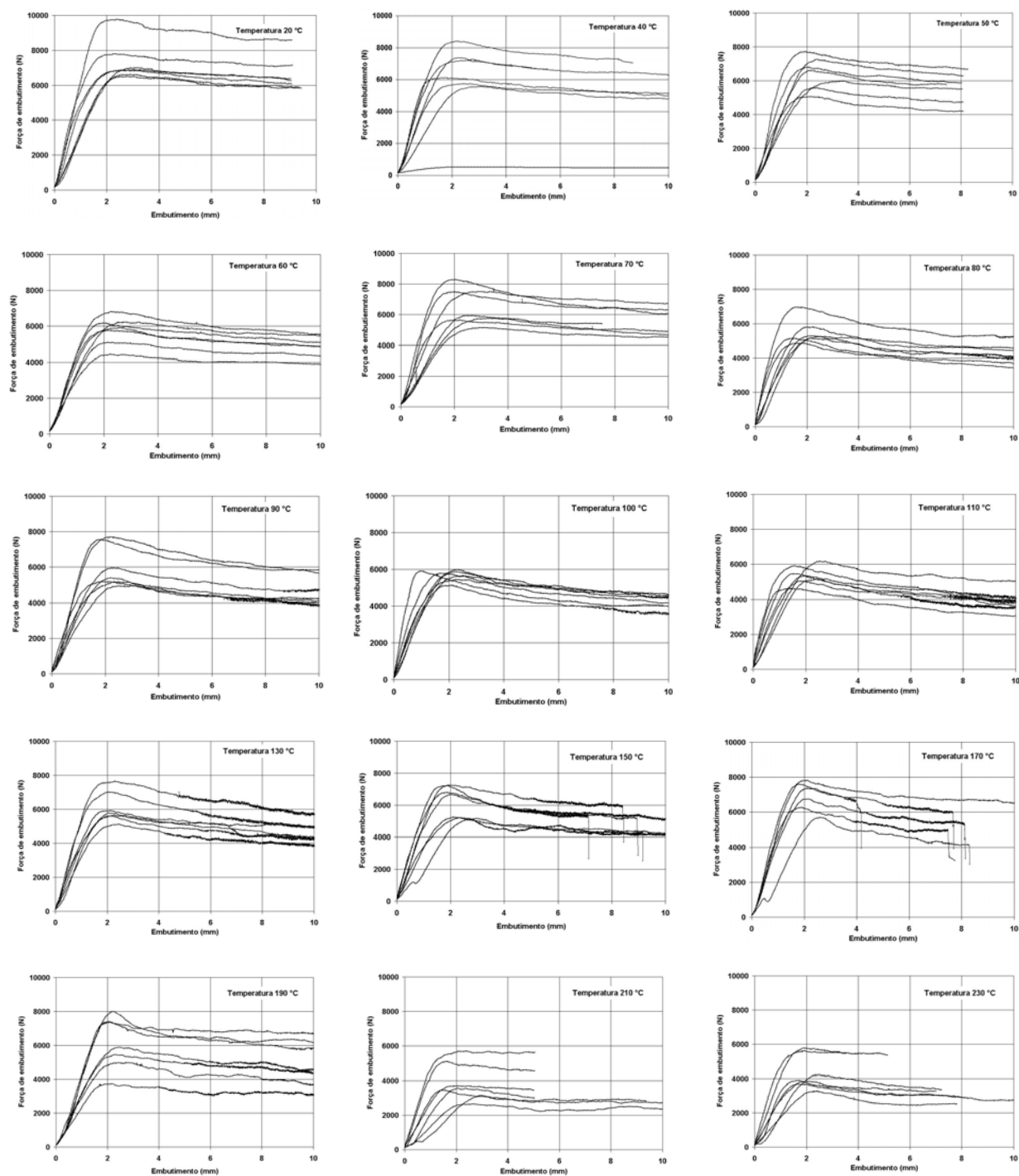
Nos ensaios de embutimento perpendicular às fibras, os corpos-de-prova ensaiados a diferentes níveis de temperatura não apresentaram diferenças significativas quanto ao tipo de ruptura. Estas se caracterizaram pelo esmagamento das fibras aderentes ao parafuso, com forte adensamento das mesmas, e posterior ruptura por tração (**Figura 69 b**). À 230 °C, a ruptura citada caracterizou-se por apresentar uma desagregação adicional do material, ocorrendo um esfacelamento das fibras (**Figura 69 b**).

À 150 °C, nos ensaios de embutimento paralelo às fibras, observou-se a existência de ruptura por fendilhamento (**Figura 70**). Segundo ALMEIDA (1987), o fendilhamento da madeira ocorre pela ruptura por tração normal às fibras ao longo de planos paralelos à direção da força transmitida pelo parafuso à madeira, sendo comum este tipo de ruptura em espécies de madeiras com resistência à compressão superior a 60 MPa, o que não é o caso da amostra de paricá usada. A resistência média à compressão paralela às fibras da amostra empregada nesta pesquisa é de 32,27 MPa, à temperatura ambiente. Segundo SCHAFFER (1973), entre 150 e 160 °C a lignina se funde e começa a ressolidificar, os corpos-de-prova perdem água de constituição dos componentes químicos, este comportamento da lignina pode explicar a forma de ruptura dos corpos-de-prova.

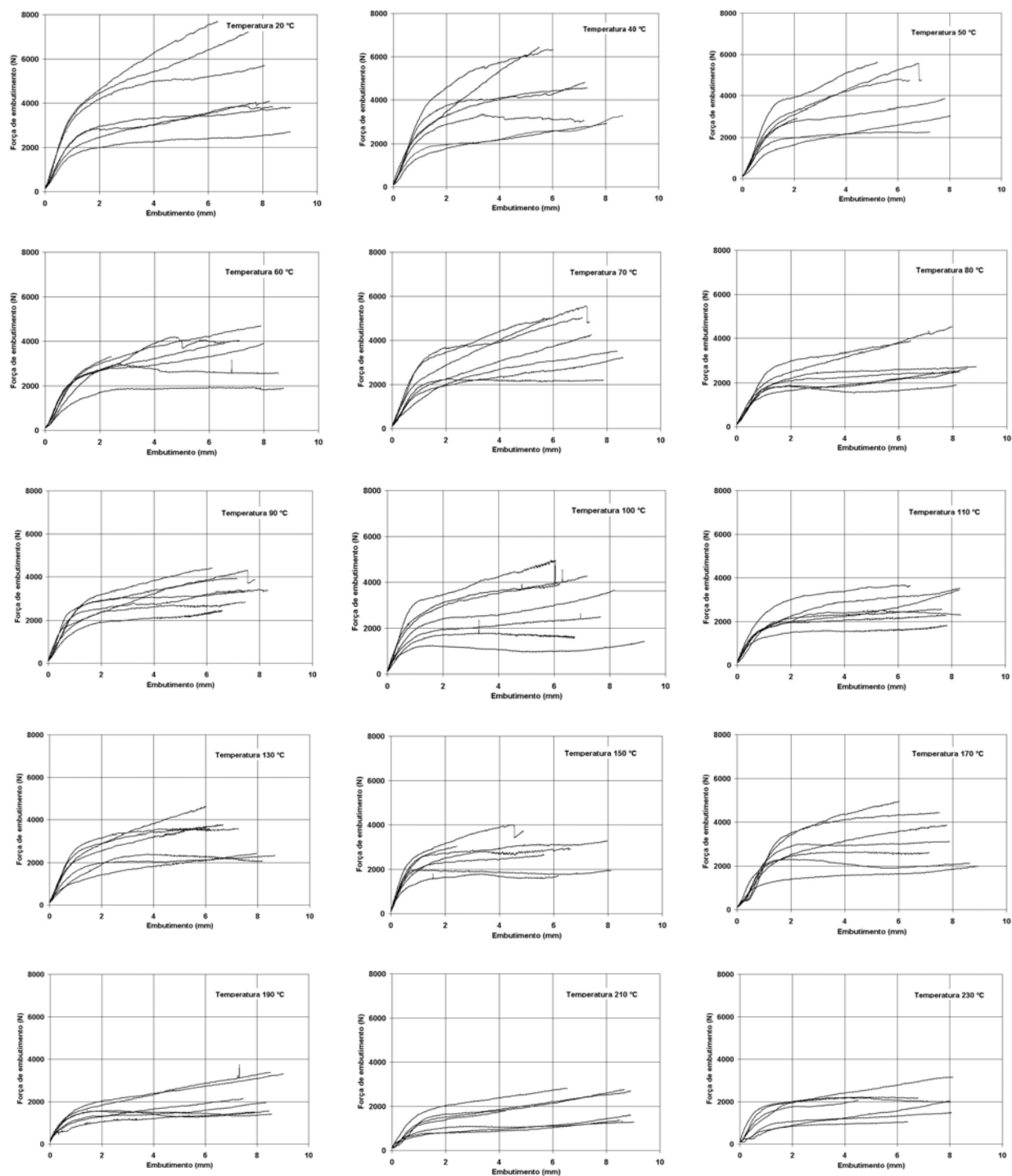


**Figura 70:** Ruptura dos corpos-de-prova por fendilhamento.

Nas **Figura 71** e **Figura 72** apresentam os gráficos força de embutimento x embutimento do parafuso, obtidos no ensaio de embutimento paralelo e perpendicular às fibras dos corpos-de-prova a diferentes níveis de temperatura. Observa-se que a força de embutimento diminui com aumento da temperatura.



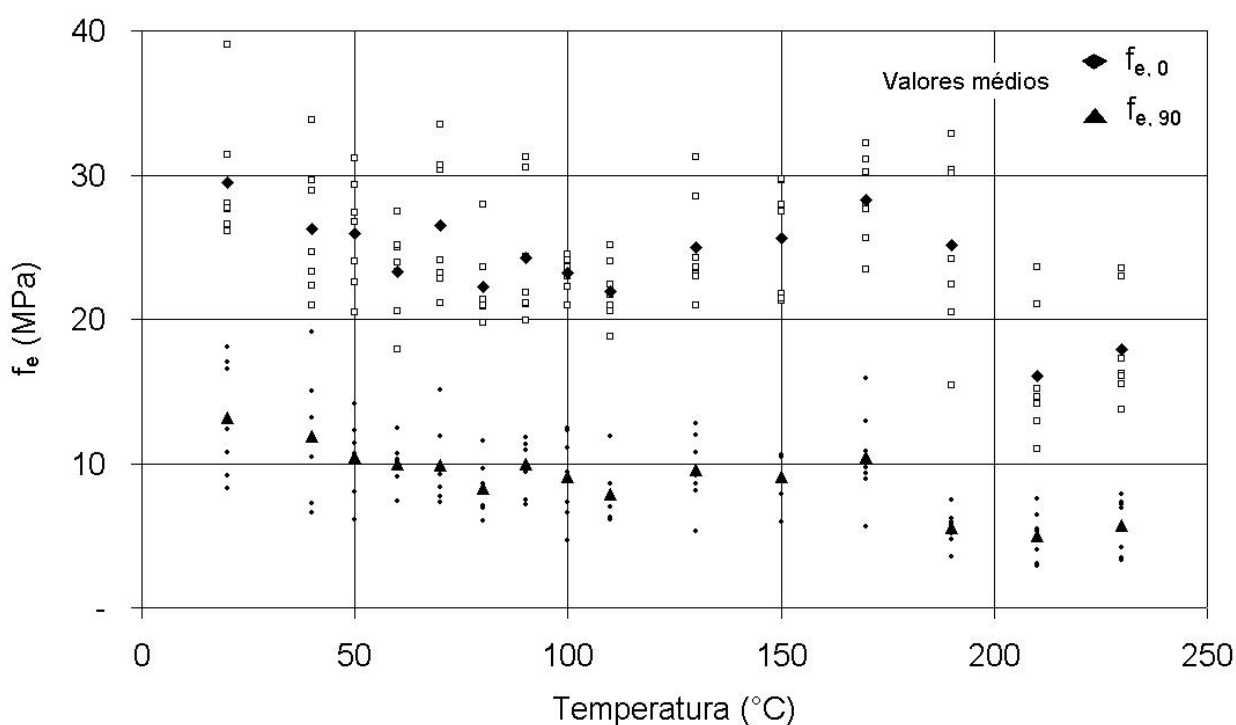
**Figura 71:** Gráficos força de embutimento paralela às fibras x embutimento.



**Figura 72:** Gráficos força de embutimento perpendicular às fibras x embutimento.

#### 4.4.4 Resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras.

Os resultados obtidos nos ensaios de embutimento paralelo ( $f_{e,0}$ ) e perpendicular às fibras ( $f_{e,90}$ ) são apresentados na **Figura 73**. Percebe-se que os valores obtidos para o embutimento paralelo às fibras são superiores daqueles do embutimento perpendicular. À 20 °C, a resistência média ao embutimento paralelo às fibras foi de 29,49 MPa  $\pm$  4,55 MPa, enquanto a resistência perpendicular foi de 13,16 MPa  $\pm$  4,00 MPa. A 230 °C, as resistências foram de 17,90 MPa  $\pm$  3,82 MPa e de 5,71 MPa  $\pm$  1,99 MPa para as resistências paralela e perpendicular às fibras, respectivamente. Isso representa uma redução 60 % e 40 %.

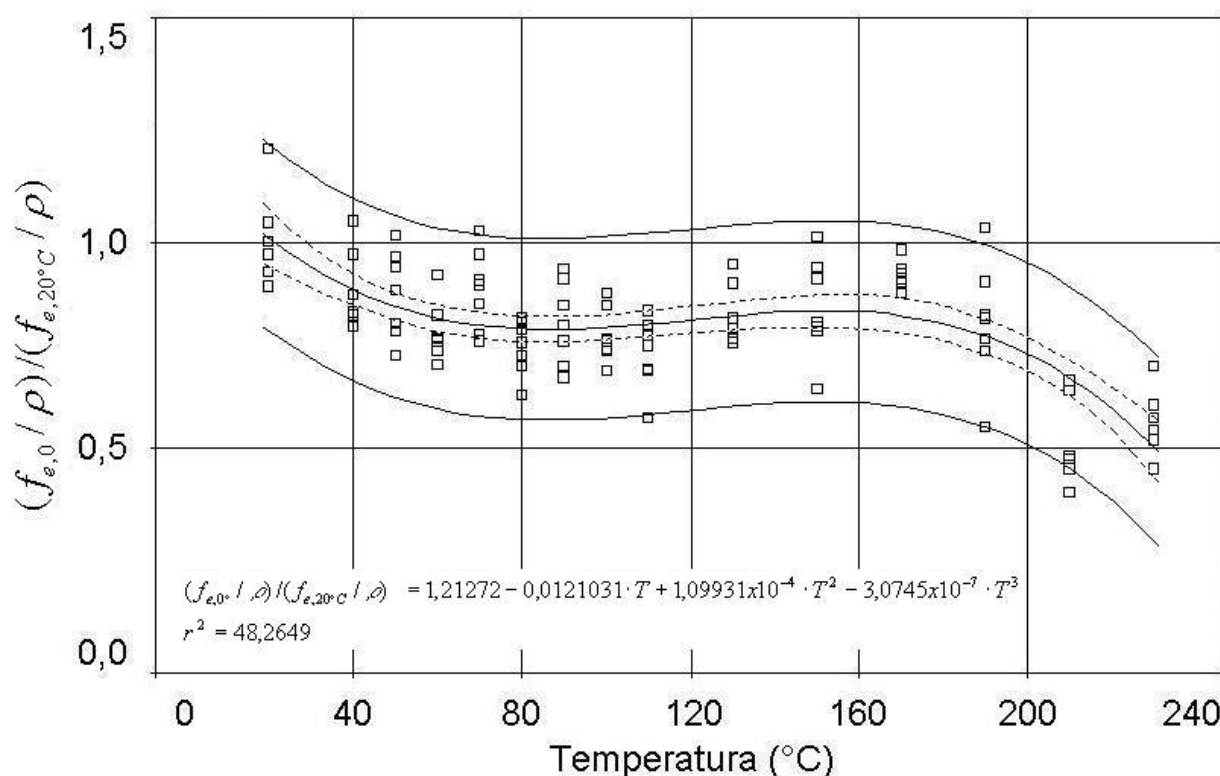


**Figura 73:** Resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras

Verificou-se, através da análise de variância, que existem diferenças significativas, com 95 % de confiança, entre os resultados de resistência ao embutimento paralelo às fibras à 20 °C e os resultados obtidos nas demais temperaturas, com a exceção dos valores obtidos à 40, 50, 70, 150 e 170 °C. Ocorrendo o mesmo com os resultados de resistência ao embutimento perpendicular às fibras, com a exceção dos valores obtidos a 40, 50 e 170 °C.

A resistência ao embutimento diminui com a temperatura de maneira não-monotônica. A 80 °C, a resistência ao embutimento perpendicular às fibras é de 8,29 MPa. Observam-se picos relativos de resistências de 9,98 MPa a 90 °C e de 9,10 MPa a 100 °C. Acima de 110 °C, a resistência novamente aumenta. A 170 °C, atinge o valor médio de 10,46 MPa. A temperaturas maiores, a resistência começa a diminuir até um valor médio mínimo de 5,71 MPa à 230 °C (**Figura 73**). Estes resultados são similares aos obtidos por MORAES et al. (2005), para o *Pinus sylvestris*. Estes pesquisadores verificaram que a umidade e a temperatura possuem papel importante na resistência ao embutimento da madeira, como o é para outras propriedades mecânicas da madeira (GERHARDS, 1982).

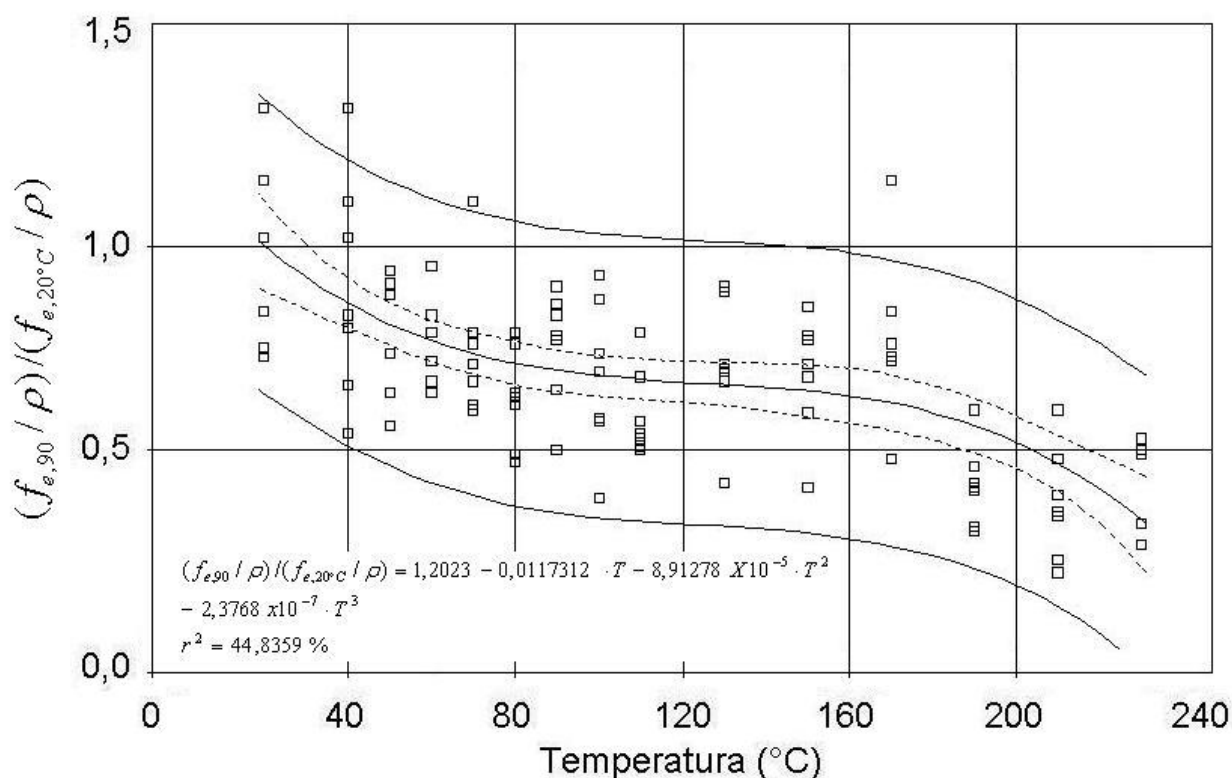
As **Figura 74** e **Figura 75** ilustram os resultados de resistência ao embutimento por massa específica normalizados. Esta normalização foi obtida pela divisão dos valores da razão resistência ao embutimento/massa específica, nos diversos níveis de temperatura, pelo valor médio dessa razão à 20 °C. As figuras citadas apresentam também os intervalos de confiança para estimativa dos valores médios e individuais da resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras normalizados, com uma confiabilidade de um 95 %.



**Figura 74:** Resistência ao embutimento paralelo às fibras normalizadas.



Nas **Figura 74** e **Figura 75**, pode ser verificado que existe uma diminuição não-monotônica da resistência ao embutimento em função da temperatura, com a existência de um valor mínimo relativo à 80 °C e uma taxa maior de diminuição a partir de 180 °C. Este comportamento pode estar associado à transição vítrea dos polímeros da madeira e ao teor de umidade. À 80 °C, o paricá apresentava um teor médio de umidade de 6,23 % e, a partir de 150 °C, estava com 0 % de umidade (**Figura 65** e **Figura 66**).



**Figura 75:** Resistência ao embutimento perpendicular às fibras relativa.

Sabe-se que a transição vítrea da madeira está vinculada à sua temperatura e ao seu teor de umidade. IRVINE (1984) constatou, através de análise térmica diferencial (DTA) à 20 % de umidade, que a transição vítrea da lignina de diversas espécies de madeira ocorre em um espectro de temperatura entre 60 e 90 °C. Para um conteúdo de umidade aproximado de 5 %, a transição vítrea da lignina da espécie *Eucayptus regnans* está próxima de 70 °C. Para ensaios de madeiras úmidas, OLSSON e SALMEN (1997) verificaram que a transição vítrea para *Ulmus americana* ocorre em torno 78 °C e para o *Pinus strobus*, em torno de 90 °C. SCHAFFER (1973) também informa que, a partir de 55 °C, a estrutura da lignina é alterada e a

hemicelulose começa a amolecer. A transição vítrea seca, para os polímeros da madeira, ocorre a altas temperaturas. Para a celulose ocorre entre 200 e 250 °C, hemicelulose ocorre em faixa de 150 a 220 °C e para lignina é superior a 205 °C (BACK e SALMÉN, 1982) o que pode justificar o comportamento da resistência ao embutimento do paricá a partir de 180 °C.

Em algumas regiões do Brasil, a temperatura ambiente pode ser superior a 35 °C durante o dia, o que pode ocasionar temperaturas entre 55 e 65 °C em alguns tipos de coberturas. Se estas coberturas forem construídas com elementos estruturais em madeira e a exposição ao calor for prolongada, ocorre a redução da resistência mecânica da madeira empregada. A norma americana AF&PA (1997) prevê a utilização de um fator de segurança que pode chegar a 0,5 para madeiras úmidas e temperaturas entre 52 e 65 °C.

## 5 Conclusões

O objetivo deste trabalho é determinar a influência da temperatura nas resistências à compressão à tração, ao cisalhamento paralelo às fibras e ao embutimento do paricá (*Schizolobium amazonicum*) oriundo de florestas plantadas para faixas de temperaturas entre 20 e 230 °C. Estas propriedades são fundamentais para o projeto de estruturas de madeira em situação de incêndio. Os resultados desta pesquisa levam às seguintes conclusões:

- O teor de umidade em todos os ensaios realizados diminuiu linearmente com o aumento da temperatura até 150 °C, neste nível de temperatura os corpos-de-prova alcançam um teor de umidade de 0 %. Constatou-se que acima desta temperatura a madeira começa a perder água de constituição, manifestando retração significativa com degradação térmica da mesma;
- a exposição dos corpos-de-prova a altas temperaturas provocam alteração da coloração tanto interna quanto externamente, sendo esta mais significativa à temperaturas superiores a 150 °C;
- existe diferença, estatisticamente significativa, com um nível de confiança de 95 %, da temperatura nas propriedades mecânicas do paricá. A análise estatístico permite afirmar que a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira se manifesta pela redução da resistência;
- recomenda-se a determinação de coeficientes de segurança que levem em consideração a redução das propriedades mecânicas deste material devido à temperatura de incêndio ou não;

#### Compressão paralela às fibras:

- a resistência a compressão paralelo às fibras diminui, de modo não-monotônico, com o aumento da temperatura, sendo que este comportamento está relacionado com o teor de umidade dos corpos-de-prova e a transição vítrea dos polímeros da madeira;
- a ruptura na compressão paralela às fibras é afetada fortemente pelo nível de temperatura, apresentando ângulos de ruptura diversos;
- a 20 °C, a resistência a compressão paralelo às fibra é 32,27 MPa  $\pm$  3,78 MPa, é 11,32 MPa  $\pm$  3,49 MPa; a 230 °C, ela apresenta uma redução de 65 %;
- existe diferença, estatisticamente significativa, com um nível de confiança de 95 %, entre resistência a compressão às fibras à 20 °C e as demais as resistências obtidas nos outros níveis de temperatura, com exceção à 150 °C.;

#### Tração paralela às fibras:

- a resistência à tração paralela às fibras também diminui com o aumento da temperatura;
- a deformação no instante da ruptura dos corpos-de-prova, diminui com aumento da temperatura;
- os corpos de prova apresentavam ruptura fibrosa para temperaturas de 20 – 40 – 80 e 90 °C, e ruptura retas para outros níveis de temperatura;
- a 20 °C, a resistência a tração paralela às fibra é 54,02 MPa  $\pm$  9,11 MPa, é 10,73 MPa  $\pm$  5,48 MPa; a 230 °C, ela apresenta uma redução de 80 %;

- existe diferença, estatisticamente significativa, com um nível de confiança de 95%, entre resistência a tração às fibras à 20 °C e as demais as resistências obtidas nos outros níveis de temperatura, com exceção à 40, 70 e 100 °C.;

#### Cisalhamento paralelo às fibras:

- entre às temperaturas de 40, 50, 70, 90, 130 °C praticamente não existem diferenças estatisticamente significativas entre a resistência ao cisalhamento, para as outras temperaturas existe diferença significativa;
- a 20 °C, a resistência a tração paralela às fibra é  $2,86 \text{ MPa} \pm 0,34 \text{ MPa}$ , é  $1,01 \text{ MPa} \pm 0,12 \text{ MPa}$ ; a 230 °C, ela apresenta uma redução de 65 % da resistência inicial;
- a ruptura dos corpos-de-prova foi paralelo ao eixo do corpo-de-prova entre 20 e 100 °C. a temperaturas superiores a 190 °C, as rupturas apresentavam um rompimento das fibras por tração.

#### Embutimento paralelo e perpendicular às fibras:

- a 20 °C, a resistência ao embutimento paralelo às fibra é  $29,49 \text{ MPa} \pm 4,55 \text{ MPa}$ , enquanto a resistência ao embutimento perpendicular é  $13,16 \text{ MPa} \pm 4,00 \text{ MPa}$ ; a 230 °C, elas apresentam uma redução de 60 % e 40 %, respectivamente;
- existe diferença, estatisticamente significativa, com um nível de confiança de 95 %, entre resistência ao embutimento do paricá à 20 °C e as demais as resistências obtidas nos outros níveis de temperatura;
- a resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras diminui, de modo não-monotônico, com o aumento da temperatura, sendo que este comportamento está relacionado com o teor de umidade dos corpos-de-prova e a transição vítrea dos polímeros da madeira;

- a ruptura dos corpos-de-prova na direção paralela às fibras é diferente daquela na direção perpendicular. No embutimento paralelo às fibras, a ruptura é caracterizada por um comportamento plástico, manifestado pela elevada penetração do parafuso sem causar o rompimento por fendilhamento nos corpos-de-prova, exceção aos resultados a 150 °C. No embutimento perpendicular, a ruptura se caracteriza pelo esmagamento das fibras aderentes ao parafuso, com forte adensamento das mesmas, e posterior ruptura por tração. Existe uma desagregação adicional do material manifestada pelo esfacelamento das fibras à 230 °C;
- recomenda-se a determinação de coeficientes de segurança para considerar a redução da resistência ao embutimento devida à temperatura de incêndio ou não;

Para dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos sobre o comportamento do paricá a elevadas temperaturas, sugere-se:

- Analisar quimicamente o grau de degradação dos polímeros principais do paricá, a partir dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios mecânicos.
- Analisar a influência simultânea da temperatura e das idades na resistência mecânica do paricá.
- Analisar a influência da temperatura na resistência mecânica de outras espécies florestais utilizadas na construção civil.
- Determinação de critérios de projetos em situação de incêndio.

## 6 Referências Bibliográficas

- AKLTA, K. e KASE, M. Determination of kinetic parameters for pyrolysis of cellulose and cellulose treated with ammonium phosphate by differential thermal analysis and thermal gravimetric analysis. **J. Poly. Sci. (A-I)** 5: 833-848, 1967.
- ALFTHAN, E. de RUVO A. e BROWN W. **Polymer** 14(7):329, 1973.
- ALMEIDA, P.A.O. **Unões pregadas de madeira**. São Paulo, 174p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1987.
- ALVAREZ, R. A. e MARTITEGUI, F. A. **Estructuras de Madera Diseño y Calculo, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho**, AITIM, 2ª edição, 2000.
- AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION (1997). **NDS-National design specification for wood construction**, pp.10-158. Washington.
- ARSENEAU, D. F. The differential thermal analysis of wood. **Can. J. Chem.** 1961. 39:1915-1919,
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira, Anexo G :Classificação visual de madeira serrada de coníferas, Projeto CE-02:126.10**. Rio de Janeiro, 1997.
- ATREYA, A. **Pyrolysis, ignition, and flame spread on horizontal surfaces of wood**. PhD. Thesis. Harvard University, Cambridge, MA, 1983.
- BACK, E.L. e SALMÉN, N.L. Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes. **Tappi J** 65(7) :107-110, 1982.
- BARRICHELO, L.E.G. e BRITTO, J.O. **Química da Madeira**, Manual Didático Piracicaba, Centro Acadêmico “Luiz de Queiróz”. USP 1989.
- BECKER, H., HÖGLUND, H. e TISTAD, G., **Paperi ja; Puu**. 59 (3): 123. 1977.
- BEALL, F.C. e EICKNER, H.W. **Thermal degradation of wood components**. Forest Products Research Paper, FPL 130, 1970
- BERKOWITZ, N. The differential thermal analysis of coal. **Fuel** 36: 355-373, 1957.
- BRADBURY, A. G. W.; SAKAI, Y. e SHAFIZADEH, F. A. Kinetic model for pyrolysis of cellulose. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.l.], v. 23, p. 3271-3280, 1979.
- BROIDO, A. Thermo gravimetric and differential thermal analysis of potassium bicarbonate contaminated cellulose. **Pyroynamics**, 1966. 4: 243-251.

BRITO, J. O. e BARRICHELO, L. E. G.IPEF. **Comportamento Isolados da Lignina e da Celulose da Madeira Frente a Carbonização** Instituto de pesquisas e estudos florestais. Circular Técnica No 28, Pbp/3.1.6, 2001.

BROWNE, F.L. **Theories of the combustion of wood and its control**. FPL. 2136. USDA Forest Products Laboratory, Madison, W, 1958.

BRYCE, D. J. e GREENWOOD, C. T. Thermal degradation of starch. Part 5. Kinetic study of the major volatiles from potato starch and its components. **Applied Polym. Symp.** 1966. 2: 149-158.

BRYDEN, K. M. **Computational modeling of wood combustion**, PhD. Thesis. University of Wisconsin-Madison, W, 1998.

BODIG, J. e JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Nostrand Reinhold, 1982. 712 p.

BUCHANAN, A. H. **Mechanical Properties of Wood Exposed to Fire**. Department of Civil Engineering University of Canterbury, New Zealand, 1998. pp 238-245.

CALVO CASTILLO, M. G. **Evaluación del Riesgo por Incendio de la Escuela de Computación de la Universidad de Costa Rica**. Informe de Trabajo de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2003.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. p. 470-475.

COMBEN, A.J. **The effect of high temperature kiln drying on the strength properties of timber Wood**, 1955. v.20, n.8, p.311-313.

CONESA, J. A., et al. Analysis of different kinetic models in the dynamic pyrolysis of cellulose. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, 1995. v. 254, p. 175-192.

COSTA, D.H.M., et al. Alguns aspectos silviculturais sobre o paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber). **Série rural 2**. Belém: Banco da Amazônia 1998. p. 8-16.

CHATTERJEE, P. K. e CONRAD, C. M. Kinetics of the pyrolysis of cotton cellulose. **Text. Res. J.** 1966. 36: 487-494.

CHAFE, S.C. Growth stresses in trees. **Australian For. Res.**, 1979. v. 9, p. 203-223.

CHRISTENSEN, F.J. e GOUGH, D.K. **Control of drying distortion in framing from young plantation slash pine**. CSIRO, Div. Buid. Res. (Rpt n. 44). 1975.

D' ALMEIDA, M. L. **Cellulose e Papel – Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica**, v.1, 2ª ed., São Paulo, Senai-IPT, 1988. p. 559.



DINWOODIE J.M. **Wood Natures Cellular Polymeric Fibre Composite**. The Institute of Metals, London, 1989

DOMANSKY, R. e RENDOS, F. On the pyrolysis of wood and its components. **Holz als Roh and Werkstoff** , 1962. 20: 473-476.

DOMBURS, G. e KISELIS, O. Thermal analysis in the chemistry of wood. **Latv. PSR Zinat. Akad. Vestis**, 1966. 12: 52-57. (Russ.).

DROW, J. T. **Effect of moisture constant on the compressive, bending, and shear strengths, and on the toughness of plywood**. U.S. For. Serv. Rep. N 1519. U.S. Dep. Agric., For.Serv., For. Prod. Lab., Madison WI. 1975.

EDDY, A. A. e GRAHAM, B. D. The effect of drying conditions on strength of coast-type Douglas-fir. **For. Prod. J.**, 1955. v. 5, n. 4, p. 226-229.

EN383:1993: **“Timber structures – Test Methods – Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners”**

FEIST, W. C., HAJNY, G. J. e SPRINGER, E. L. Effect of storing green wood chips at elevated temperatures. 1973. **Tappi** 56(8):91–95.

FENGEL, D. On the changes of the wood and its components within the temperature range up to 200° C— Part II: The hemicelluloses in untreated and thermally treated sprucewood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, 1966.24: 98-109. (Ger.)

FENGEL, D. e WEGENER, G. **Wood chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin, Walter de Gruyter, 1984. 613p.

FENGEL, D. e WENEGER, G. **Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Walter de Gruyter Publisher. New York, 1989. p. 613.

GERHARDS, C. C. Effect of the Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects. **Wood and Fiber**, 1982. vol.14, N 1, pp 4-36.

GOLOVA, O. P. e KRYLOVA, R. G. 1957. Thermal decomposition of cellulose and its structure. **Doklady Akad. Nauk S.S.S.R.** 116(3): 419-421. (Russ.).

GOMES, P. A. e OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W.R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 27-41.

GORMG, D. A. Í. Thermal Softening of Lignin, Hemicellulose, and Cellulose, Pulp and Paper, **Magazine of Canada**, 1963. Vol. 64, pp. T517-527.

GOTTLIEB, I. M. A theory of flame-retardant finishes. **Text. Res.** 1956. J. 26:156-167.

GRAHAM, R. **Effect of preservative treatment and related conditions on wood strength**, Oregon State University, Forest Products Research Center. Project, 1958. 44A-4.

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E. e KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: **Wood handbook wood as an engineering material**. Gen Tech Rep FPL-GTR-113. US department of Agriculture, Madison, 1999 .pp 1- 45.

GUEDIRA, F. **Pyrolise lente de la biomasse: comportement compare des tourteux d olives, de la bagasse de canne a sucre et la sciure de bois (*Pine maritime*)**. 1988. 122 f. Thèse (Docteur) - Université Mohamed, Maroc.

HARTL, H. Behaviour of timber and wood based materials in fire, **STEP lecture A13 Zivilingenieur für Bauwesen**. 1995.

HARKIN, J.M. **Private communication**, Forest Products Laboratory, Madison, Wis. 1969.

HOLMES, F. H. e SHAW, C. J. G. The pyrolysis of cellulose and the action of flame-retardants. I. Significance and analysis of the tar. **J. Appl. Chem**, 1961. 11: 210-216.

HUFFMAN, D. E. Kiln drying of aspen studs. **For. Prod. J.**, 1972. v. 22, n. 10, p. 21-23.

IFJU, G. Tensile Strength Behavior as a Function of Cellulose in Wood, **Forest Products Journal**, 1964. Vol. 8, p. 366.

IPT, **Manual de Preservação de Madeiras**, Volume I, 1986.

IRVINE, G. The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis. **Tappi J** 67(5). 1984. p116-121.

INSTITUTO DE CONSTRUCCIÓN CON MADERA, (Acessado em: 2006) **“Resistencia superior al fuego”** Disponível em [http://www.softwood.org/AITC\\_eVersion/ES/index.htm](http://www.softwood.org/AITC_eVersion/ES/index.htm),

JOHANSEN, K. W. Theory of timber connections. **Internatinal Association for Bridge and Structural Engineering**, Zurich, v.9, p.249-262, 1949.

KATO, K e TAKAHASHI, N. Pyrolysis of cellulose. II. Thermo gravimetric analyses and determination of carbonyl and carboxyl groups in pyrocellulose. **Agr. and Biol. Chem.** 1967. 31(5): 519-524. (Tokyo.).

KEYLWERTH, R. e CHRISTOPH, N. Study of thermal decomposition of wood by using differential thermal analysis. **Material prüfung**. 1960.2(8): 281-288.

KEYLWERTH, R. High temperature drying installations. **Holz als Roh-und Werkstoff**. 1952. v. 10, n. 4, p. 134-138.

KILZER, F. J. e BROIDO, A. Speculations on the nature of cellulose pyrolysis. **Pyrodynamics**, 1965.2: 151-163.

KNUDSON, R. M. e SCHNIEWIND, A. P. Performance of structural wood members exposed to fire. **Forest Prod. J.** 1975. 25(2): 23-32.

KOLLMANN, F. e FENGEL, D. Changes in the chemical composition of wood by thermal treatment. **Holz als Roh und Werkstoff**, 1965.23: 461-468. (Ger.).

KOLLMANN, F. F. P. e COTE, W. A. Jr. **Principles of wood Science and Technology**. In: Solid wood. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1968. p592.

KOZLIK, C. J. **Effect Of High-Temperature Drying Softwoods On The Mechanical Properties Of Wood**. In: Res. Conference On High-Temperature Drying Effects on Mechanical Properties of Softwood Lumber, 1976. Madison. Proceeding... Madison: USDA.

KOZLIK, C. J. **Effect of Kiln conditions on the strength of Douglas-fir and Western hemlock**. For. Res. Lab. Oreg. State Univ., Corvallis, 1967.Rep D - 9.

KNUDSON, R. M. e SCHNIEWIND, A. P. Performance of structural wood members exposed to fire. **Forest Products Journal**, 1975. v. 25, n. 2, pp.23-32.

KUDO, K. e YOSHIDA, E. On the decomposition process of wood constituents in the course of carbonization. I. The decomposition of carbohydrate and lignin in mizunara (Quercus crispula Blume) wood. **J. Jap. Wood Res. Soc.** 1957. 3(4): 125-127.

LADELL, J. L. High-temperature drying of yellow birch. **For. Prod. J.**, v. 6, n. 11. 1956. p. 469-475.

LAU, P. W. e BARRETT, J. D. **Modelling Tension Strength Behaviour of Structural Lumber Exposed to Elevated Temperatures**. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on the Fire Safety Science, Melbourne, 1979. pp 1177-1188.

LE COINTE, P. **Árvores e plantas úteis: indígenas e aclimadas**. 2. ed. São Paulo: Nacional, 1947. 496 p. (Brasiliense, 251).

LEONT'EV, N. L. The strength of wood at varying moisture content. **Derev. Prom.** 1960. 10:17-18.

LE VAN, S. M.; ROSS, R. J. e WINANDY, J. E. **Effects of fire retardant chemicals on the bending properties of wood at elevated temperatures**. USDA Research Paper. 1990. FPL-RP-498, Madison, WI.

LIPSKA, A. E. **The pyrolysis of cellulosic and synthetic materials in a fire environment**. U.S. Clearinghouse Fed. Sci. Tech. Inform. AD-645858, 1966. 33 pp.

MACLEAN, J. D. **Effect of Steaming on The Strength of Wood**. American Wood Preservers' Association Proceedings, 1953. V. 49, P. 81-112.

MACLEAN, J. D. **Effect of Heating in Water on Strength Properties of Wood.** American Wood Preservers' Association Proceedings, 1954. V. 50, P. 253-281.

MACLEAN, J. D. **Effect of Oven Heating And Hot Pressing on Strength Properties of Wood.** American Wood Preservers' Association Proceedings, 1956. V. 51, P. 227-250.

MAJOR, W. D. The degradation of cellulose in oxygen and nitrogen at high temperatures. 1958. **Tappi** 41: 530-537.

MARTINS COSTA, D. H.; Rebello F. K. e D'Ávila J. L. ; Souza dos Santos M. A. ; Bahia Lopes M. L. Série Rural 2 Banco Da Amazônia O Primeiro E Único Banco Da Amazônia "**Alguns Aspectos Silviculturais Sobre O Paricá**" (*Schizolobium Amazonicum* Huber). 1998.

MELO, J. E.; CARVALHO, G. M. e MARTINS, V. A. **Espécies madeireiras substitutas do mogno (*Swietenia macrophylla* King.).** Brasília: IBAMA, 1989.16 p. (Série Técnica, 6).

MILLETT, M. e GERHARS, C. Accelerated aging, residual weight and flexural properties of wood heated in air at 115°C to 175°: **Wood Science**, 1972. v. 4, n. 4, p. 193-201.

MILLER, R. S. e BELLAN J. **A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics.** Paper 96F-057, Western States Section of the Combustion Institute, 1996.

MILLET, M. A. e GOEDKEN, V. L. Modification of cellulose fine structure. Effect of thermal and electron irradiation pretreatments, 1965. **Tappi** 48: 367-371.

MINISTERIO DE SALUD DE CHILE (2005).) **Manual de Prevención de Incendios en Centros de Salud.** Disponível em <http://www.disaster-info.net/Chile/manualincendios/>. Acessado em 2007.

MONTGOMERY, DC, RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**, 3<sup>rd</sup> edn. Wiley, New York. 2003.

MORAES, P.D.; ROGAUME, Y e TRIBOULOT, P. (2005). Influence of Temperature on the embedding strength. **Holz als Roh-und Werkstoff** (2005) 63:297-302.

MURPHY, E. J. Thermal decomposition of natural cellulose in vacuo. **J Polymer Sci.** 1962. 58: 649-655.

NYMAN, C. **The Effect of Temperature and Moisture on the Strength of Wood and Gluelines:** Forest Products Laboratory Report N 6, 1980.

NORMALISATION FRANÇAISE NF EN 383. **Détermination de caractéristiques de fondation et de la portance locale d'éléments d'assemblages de type broche.**, 1993. France.

ODEEN, K. Fire resistance of glued, laminated timber structures, In: **Fire and structural use of timber in buildings**, 1970. pp 8-15. Her Majestys Stationery Office, London England.

OHSAWA, J. e YONEDA, Y. Shear Test of Woods as a Model of Defibration. **Journal of the Japanese Wood Research Society**, 1978. vol.24, N. 4. pp 230-236.

OLSSON, A. M. e SALMÉN, L. **Humidity and temperature affecting hemicellulose softening in wood**. In: International conference of COAST action E8. Denmark, 1997. pp269-279.

OKUYAMA, T.; SUZUKI, S. e TERAZAWA, S. Effect of temperature on orthotropic properties of wood. I. On the transverse anisotropy in bending, **Journal of the Japanese Wood Research Society**, 1977 Vol. 23, N°.12. pp 609-616.

OSTMAN, B.A.; Wood Tensile Strength at Temperature and Moisture Contents Simulating Fire Conditions. **Wood Science and Technology**, 1985. Vol. 19 pp 103 – 116

PAKHOMOV, A. M. Radical mechanism of thermal decomposition of cellulose and formation of le voglucosan. **Izvest. Akad. Nauk S.S.S.R., Otdel. Khim. Nauk**, 1957. 1497-1499. (Russ.)

PEREIRA, A. P.; MELO, C. F. M. e ALVES, S. M. O paricá (*Schizolobium amazonicum*) características gerais da espécie e suas possibilidades de aproveitamento na indústria de celulose e papel. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, 1982. v. 16 A, n 2. p. 1340-1344.

PETRI, L. F. Hochtemperaturtrocknung von birken, aspen und lindenholz in überhitztem dampf bei atmosphärischen druck. **Holz als roh-und. Werkstoff**, 1963. v. 22, n. 11, 38 p.

PRATT, G. H., **Timber drying manual**. London: Department of the Environment. 1986, 122 p.

PREUSSER, R. Plastic and Elastic Behaviour of Wood Affected by Heat in Open Systems. **Holz technologie**, 1968. vol. 9, n4. pp 229 – 231.

QUISEN, R. C., et. al. **Essência florestal de rápido crescimento**. (Embrapa-Boletim técnico). Brasília, 1999.

RAMLAH, M. V. e GORING, D. A. I. Some dilatometric measurements of the thermal decomposition of cellulose, hemicellulose, and lignin. **CeUul. Chem. Technol. (Jassy)**, 1967. 1(3): 277-285.

RESENDE, D. J. **Análise da combustão e carbonização do eucalyptus spp por termogravimetria**. 1995. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ROSEN, H. N. e BODKIN, R. E. Development of a schedule for jet drying *yellow-poplar*. **For. Prod. J.**, 1981. v. 31, n. 3, p. 39-44.

ROSEN, H. N. e LAURIE, S. E. Mechanical properties of conventionally kiln-dried and pressure steam dried *yellow-poplar* and *red oak*. **For. Prod. J.**, 1983. v. 33, p. 123-134.

SALMEN, N. L. Pulp Paper Can. **Trans. Techn.** Sec.5(3): TR45. 1979.

SALAMON, M. High-temperature drying and its effects on wood properties. **For. Prod. J.**, 1969. v. 19, n. 3, p. 27-34.

SALAZAR, C. M. e CONNOR, M. A. **Kinetic studies of the pyrolysis of wood, with particular reference to *eucalyptus regnans***. In: Australian Conference On Chemical Engineering, 11, Brisbane. Proceedings... Brisbane: [s.n.], 1983.

SANO, E. Effects of temperature on the mechanical properties of wood. I. Compression parallel to grain. II. Tension parallel to grain. III. Torsion test, **Journal of the Japanese Wood Research Society**, 1961. Vol. 7, N°.4. pp 147-150, vol. 7, N°.5. pp 189-193.

SARKANEN, K. V. e LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York, Wiley – Interscience, 1971, 916p.

SERGEEVA, V. N. e VAIVADS, A. Thermographic study of the pyrolysis of wood and its constituents. **Latvijas PSR Zinft. Akad. Vestis**, 1954. 86(9): 103-108. (Russ.)

SCHNEIDER, A. Investigations on The Convection Drying of Lumber at Extremely High Temperature. Part II: Drying Degradation, Changes in Sorption, Colour and Strength of *Pine Sapwood*. **Holz Als Roh-Und Werkstoff**, 1973. V. 31, P. 198-206.

SCHWENKER, R. F., Jr. e PACSU, E. Pyrolytic degradation products of cellulose. **Chem. Eng.** 1957. 2(1): 83-88.

STAMM, A. J. Thermal degradation of wood and cellulose. **Ind. and Eng. Chem.** 1956. 48: 413-417.

**Standard Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes**. (1994), ASTM D198-84,. American Society for Testing Materials and Materials.

SKAAR, C. **Effect of high temperature on the rate of degradation and reduction of hygroscopicity of wood**. In: Res. Conf. on High Temperature Drying Effects on Mechanical, 1976.

SZÜCS, C. A, et. al. **Proposta em Ensaios para Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeira**. VI EBRAMEN, UFSC, 1998. V1, p135

SCHAFFER, E. L. **Charring rate of selected woods-transverse to grain**. Madison, WI: US Department of agriculture, Forest Products Laboratory, 1967.

SCHAFFER, E. L. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strenght of dry Douglas fir. **Journal of testing and evaluation**, 1973. v. 1, n. 4, p 319-329.

SCHAFFER, E.L. **Strength Validation and Fire Endurane of Glued Laminate Timber Beams**. Research Paper FPL 467. US Forest Products Laboratory, Madison, WI, 1986.

SCHNIEWIND, A. P. **Concise Encyclopedia of Wood and Wood-Based Materials**. Edition Elmsford, NY: Pergamon Press, 1985. 271-273

SHAFIZADEH, F. The chemistry of pyrolysis and combustion In: Rowell RM (ed). **The Chemistry of Solid Wood**. Advances in Chemistry Series 207, ACS, Washington, 1984. D, pp. 489-530.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry fundamentals and applications**, Orlando Academic Press, New York, p. 223, 1981.

SULZBERGER, P. H. The effect of temperature on the strength of wood, plywood and glued joints. **Aust. Aeron. Sec. Consult. Com. Rep.**, 1953. 44 p. ACA-46.

SUCHSLAND, O e WOODSON, G. E. **Fiberboard manufacturing practices in the United States**, Madison: Forest Products Research Society, 1991. p 263.

TANG, W. K. Effect of flame-retardants on pyrolysis and combustion of  $\alpha$  cellulose. **J. Poly. Sci.** 1964. Part C(6): 65-81.

TANG, W. K. **Effect of inorganic salts on pyrolysis of wood, alpha-cellulose, and lignin determined by dynamic thermogravimetry**. U.S. Forest Serv. Res. Pap. 1967. FPL 71, 16 pp. Forest Prod. Lab., Madison, Wis.

TEREZO, R, e SZÜCS, C. A. Anatomic and Mechanical Properties of Schizolobium amazonicum of Different Ages, 2007. **All Division 5 Conference, Forest Products and Environment**, Taipei, Taiwan.

TOMASELLI, I. **The influence of High Temperature Drying on Physical and Mechanical Properties of *Pinus radiata***, 1977. 264p. Thesis (PhD) – University of Melbourne, Melbourne.

THOMAS, G. C. e BUCHANAN, A. H. **In Proceeding of the Fourth International FIRE and Materials** Conference; Marriot Hotel, Crystal City Virginia, USA, John Wiley e Sons Ltd, Chichester. 1995.

YOUNG, S. A. e CLANCY, P. Compression Mechanical Properties of Wood at Temperatures Simulating Fire Conditions. **Fire and Materials**, 2001, 25, p83 -93.

VAN KREVELEN, D. W., VAN HEERDEN, C. e HUNTICNS, F. J. Physiochemical aspects of thepy-rolysis of coal and related organic compounds. **Fuel**, 1951. 30: 253-259. (Netherlands.)

VOVELLE, C. e MELLOOTTEE, H. Modelisation de La Pyrolyse Oxydante ou Noxydante De Bois Ou De Déchets Végétaux À Partir De Leurs Composants. In: PALZ, W.; CHARTIER, P. (Eds.). **Energy From Biomass**. 2. Ed. London: Applied Sciences, 1982. P. 925-929.

WILSON, T. R. C. **Strength moisture relations for wood**. USDA tech. Bull. N 282. U.S. Dep. Agric., Washington, D.C. 1932.

ZOBEL, B. J. e VAN BUIJTENEN, J. P. Wood variation its causes and control. New York: **Springer-Verlag**, 1989.